

CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO SOCIAL REABILITADOS

ANTÓNIO JOSÉ CANDEIAS CURADO

Tese submetida para obtenção do grau de
DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas

Co-Orientador: Professor Doutor Nuno Ramos

JANEIRO DE 2014

À memória de minha Mãe. Sempre presente em cada passo!

"Simple is Beautiful."

AGRADECIMENTOS

Serei muito breve nos agradecimentos:

- Aos meus Orientadores pela sua competência e sabedoria, pelo encorajamento constante e pela disponibilidade em reunir comigo sempre que o desejei e solicitei;
- Aos meus Colegas de grupo do Instituto Politécnico de Viana do Castelo por me terem substituído sempre que de tal necessitei para me dedicar ao doutoramento;
- À DomusSocial e ao IHRU por me terem facultado o acesso a tudo aquilo de que necessitei no decurso da Tese;
- Aos meus Filhos pela compreensão das minhas ausências, e pelo tempo que lhes subtraí ao longo desta “maratona”.

RESUMO

A realidade social e económica dos bairros de habitação social em Portugal, onde reside maioritariamente uma população sem práticas de aquecimento e de arrefecimento ambiente, determina a adoção de estratégias de reabilitação passivas, que muito embora possam conduzir a um maior investimento inicial, apresentam a prazo menores custos de manutenção.

A Tese desenvolvida pretende definir a melhor estratégia de reabilitação passiva dos edifícios de habitação social, tendo-se para o efeito procedido à avaliação do conforto térmico de um conjunto de habitação social reabilitado tomado como Caso de Estudo, em condições de serviço, com recurso à aplicação de modelos adaptativos.

O estudo desenvolvido tem quatro objetivos definidos como primordiais: caraterizar o desempenho térmico, em serviço, de um conjunto de habitação social reabilitado, validar o modelo de simulação numérica com resultados de experimentação, desenvolver estudos de sensibilidade num conjunto de cenários de simulação numérica, em 4 localizações geográficas representativas do território nacional, para avaliação da influência das estratégias de reabilitação no conforto térmico e na eficiência energética, e desenvolver um indicador de desempenho térmico (Indicador de Desconforto Térmico - $D_{x,y}$) para avaliação da influência do isolamento das paredes de fachada e da ventilação noturna, no conforto térmico dos edifícios de habitação social.

O estudo de sensibilidade desenvolvido permitiu avaliar a melhoria do desempenho térmico e energético da solução preexistente, no inverno e no verão, nas 4 localizações geográficas estudadas, e demonstrou que é possível ter conforto térmico de inverno, sem aquecimento do ar ambiente, em Lisboa e Faro, e ter conforto térmico de verão, sem arrefecimento do ar ambiente, no Porto.

Foi definido na Tese um indicador de desempenho designado por Indicador de Desconforto Térmico ($D_{x,y}$), que tendo como base de análise os valores horários da temperatura do ar interior, permitiu avaliar o desconforto térmico de inverno e de verão. O cálculo do seu valor permitiu estabelecer uma representação gráfica no mapa de Portugal, das soluções de isolamento de paredes de fachada e de ventilação noturna.

No final do estudo foram sintetizadas um conjunto de recomendações a aplicar na reabilitação de paredes de fachada e da ventilação noturna, de forma incrementar o conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios de habitação social, em reabilitações futuras. As recomendações sintetizadas preconizam: o isolamento das paredes exteriores de edifícios de habitação social em Bragança, e dispensam a sua aplicação no Porto, em Faro e em Lisboa; a adoção de mecanismos de ventilação noturna para redução do desconforto térmico de verão, em Lisboa e Faro, com um valor-limite inferior para a taxa de renovação de ar de 4 h^{-1} , valor a partir do qual a redução do desconforto térmico de verão não é significativa.

PALAVRAS-CHAVE: Conforto Térmico Adaptativo, Desempenho Térmico, Eficiência Energética, Reabilitação Passiva, Habitação Social.

ABSTRACT

The current socio-economic conditions of social housing neighborhoods in Portugal, where people generally don't have heating or cooling habits, determines the adoption of passive retrofitting strategies, even though they may lead to a higher initial investment, in a short period of time they will reduce the costs of maintenance .

The PhD thesis defines the best strategy for a passive retrofitting of social housing buildings, based upon a thermal comfort assessment of a social housing retrofitted neighborhood taken as a Case Study, using adaptive models.

The four primary goals of the thesis are: characterize the thermal performance of a retrofitted social housing neighborhood, taken as Case study, in a free floating temperature variation system; validate the numerical simulation model with the experimental measurements; develop sensitivity analysis studies for a set of numerical simulation scenarios, in 4 different geographical locations in Portugal, to assess the influence of retrofitting strategies on thermal comfort and energy efficiency, and to develop a thermal performance indicator (Thermal Discomfort Index - $D_{x,y}$) to evaluate the influence of the façade thermal insulation, and summer cooling with night ventilation, on social housing thermal comfort.

The sensitivity analysis studies have revealed that the building retrofitting strategy adopted in the Case Study would improve the thermal behavior and the energy performance of the original building, both in winter and summer conditions, in the 4 geographic locations in Portugal. The studies also demonstrated that it is possible to have thermal comfort in the winter season without heating, in Lisbon and Faro, and have thermal comfort in the summer season without cooling, in Porto.

The calculation of the thermal performance indicator (Thermal Discomfort Index - $D_{x,y}$), which is based on the analysis of the hourly values of the indoor air temperature, allowed to evaluate both winter and summer thermal discomfort, and made possible to zone in a map, the retrofitting solutions for façade thermal insulation, and summer night ventilation.

At the end of the Thesis it was synthesized a set of retrofitting recommendations to be done in the façade walls and summer night ventilation, in order to increase the thermal comfort and energy efficiency on social housing retrofitting. Those recommendations advise for thermal insulation in façade walls of social housing buildings in Bragança, and dismiss its application in Porto, Faro and Lisbon, and encourage night summer cooling ventilation, in order to reduce summer heat discomfort, both in Lisbon and Faro. Ventilation rates over 4 ACH (Air Changes per Hour) are not significant for summer thermal discomfort reduction.

KEYWORDS: Adaptive Thermal Comfort, Thermal Performance, Energy Efficiency, Passive Retrofitting, Social Housing.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO	4
2. O ESTADO DA ARTE SOBRE REABILITAÇÃO, CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO SOCIAL	7
2.1. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO SOCIAL	7
2.1.1. INTRODUÇÃO	7
2.1.2. A HABITAÇÃO SOCIAL EM PORTUGAL	8
2.1.3. CARATERIZAÇÃO ATUAL DA HABITAÇÃO SOCIAL	11
2.1.4. SÍNTESE	13
2.2. ABORDAGEM ADAPTATIVA DO CONFORTO TÉRMICO	13
2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	13
2.2.2. BALANÇO TÉRMICO	14
2.2.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA QUALIDADE DO AR INTERIOR	15
2.2.3.1. ABORDAGEM ANALÍTICA VERSUS ABORDAGEM ADAPTATIVA	15
2.2.3.2. ADAPTAÇÃO TÉRMICA	17
2.2.4. MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO	18
2.2.4.1. ENQUADRAMENTO	18
2.2.4.2. MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO – ASHRAE 55	18
2.2.4.3. MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO – EN 15251	20
2.2.4.4. MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO – LNEC	23
2.2.4.5. CORREÇÃO DA TEMPERATURA OPERATIVA DE CONFORTO	25
2.2.5. UTILIZAÇÃO DO CO ₂ COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO AR INTERIOR	26
2.2.6. SÍNTESE	27

2.3. CONSUMOS ENERGÉTICOS	28
2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	28
2.3.2. CONSUMOS ESPECÍFICOS DO SETOR DOMÉSTICO	29
2.3.3. SÍNTESE	30
2.4. VENTILAÇÃO NOTURNA	31
2.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	31
2.4.2. PRINCIPAIS ESTUDOS NO ÂMBITO DA VENTILAÇÃO NOTURNA	31
2.4.3. SÍNTESE	32
2.5. PRINCIPAIS ESTUDOS REALIZADOS NO ÂMBITO DA TESE	32
2.5.1. ESTUDOS NACIONAIS	32
2.5.2. ESTUDOS INTERNACIONAIS	33
3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO EM SERVIÇO	35
3.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA	35
3.2. CARATERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS EM ESTUDO	36
3.2.1. BREVE DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO	36
3.2.2. SOLUÇÕES CONSTRUTIVA PRÉ-REABILITAÇÃO	38
3.2.3. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PÓS-REABILITAÇÃO	39
3.3. DESCRIÇÃO DETALHADA DA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO ADOTADA	42
3.3.1. PLANO DE MEDIÇÕES	42
3.3.2. DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO	44
3.3.3. IMPLANTAÇÃO DE DISPOSITIVOS <i>IN SITU</i>	46
3.3.4. DADOS CLIMÁTICOS	48
3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS	51
3.4.1. INTRODUÇÃO	51
3.4.2. MEDIÇÃO ANUAL DO APARTAMENTO-TIPO	51
3.4.2.1. ENQUADRAMENTO	51
3.4.2.2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR	52
3.4.2.3. MEDIÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA DO AR INTERIOR	57
3.4.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO	60
3.4.3.1. INTRODUÇÃO	60
3.4.3.2. MODELO ADAPTATIVO – EN 15251	61
3.4.3.3. MODELO ADAPTATIVO – ASHRAE 55	62

3.4.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR	64
3.4.4.1. INTRODUÇÃO	64
3.4.4.2. CONCENTRAÇÃO DE CO ₂	64
3.4.5. CONCLUSÕES	67
3.5. VARIABILIDADE DO DESEMPENHO TÉRMICO	69
3.5.1. ENQUADRAMENTO	69
3.5.2. INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE MEDIÇÃO	70
3.5.3. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO EM PRUMADA.....	73
3.5.4. INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA	76
3.5.5. INFLUÊNCIA DA OCUPAÇÃO.....	78
3.5.6. SÍNTESE DE RESULTADOS	80
3.6. VARIABILIDADE DA PERMEABILIDADE AO AR DA ENVOLVENTE	81
3.6.1. RESULTADOS DO ENSAIO DA PORTA VENTILADORA	81
3.6.2. ANÁLISE DE RESULTADOS	83
3.7. CONCLUSÕES.....	86
4. SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO EM REGIME DINÂMICO	89
4.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	89
4.2. SELEÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	90
4.2.1. ESPECIFICIDADES DO PROGRAMA	90
4.2.2. CÁLCULO DO BALANÇO TÉRMICO NO PROGRAMA <i>ENERGYPLUS</i>	91
4.3. CONSTRUÇÃO DO FICHEIRO CLIMÁTICO	94
4.3.1. FICHEIRO CLIMÁTICO ANUAL DO TIPO <i>TMY</i>	94
4.3.2. FICHEIRO CLIMÁTICO ANUAL DO TIPO <i>REAL TIME WEATHER</i>	95
4.4. CONSTRUÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO	97
4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	102
4.5.1. INTRODUÇÃO	102
4.5.2. LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	103
4.5.3. PERÍODO DE SIMULAÇÃO	103
4.5.4. CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS.....	103
4.5.4.1. ENQUADRAMENTO	103
4.5.4.2. MODELAÇÃO DA ENVOLVENTE OPACA EXTERIOR	104
4.5.4.3. MODELAÇÃO DA ENVOLVENTE ENVIDRAÇADA EXTERIOR.....	106

4.5.5. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO.....	107
4.5.5.1. ENQUADRAMENTO	107
4.5.5.2. SISTEMA DE VENTILAÇÃO IMPLEMENTADO	107
4.5.5.3. MODELAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO.....	108
4.5.6. CARACTERIZAÇÃO DOS GANHOS INTERNOS	109
4.5.6.1. ENQUADRAMENTO	109
4.5.6.2. MODELAÇÃO DOS GANHOS INTERNOS	111
4.5.7. CARACTERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE UTILIZAÇÃO	112
4.6. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	115
4.6.1. INTRODUÇÃO	115
4.6.2. VARIAÇÃO ANUAL DA TEMPERATURA DO AR.....	116
4.6.3. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NO INVERNO (DEZ.2012, JAN. E FEV. 2013)	119
4.6.4. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NO VERÃO (JULHO, AGOSTO E SET. 2013)	124
4.7. CONCLUSÕES.....	129
5. INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO NO CONFORTO E ENERGIA – ESTUDO DE SENSIBILIDADE	131
5.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	131
5.2. SELEÇÃO DOS CENÁRIOS CRÍTICOS	132
5.2.1. PARÂMETROS CONSIDERADOS	132
5.2.2. ESQUEMA EM ÁRVORE	133
5.2.3. CENÁRIOS CONDICIONANTES	134
5.2.4. CENÁRIOS SELECIONADOS	136
5.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DO CLIMA EXTERIOR.....	137
5.3.1. ESTRATÉGIA ADOTADA.....	137
5.3.2. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO PORTO	138
5.3.2.1. CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO	138
5.3.2.2. CONFORTO TÉRMICO NA VERÃO	141
5.3.2.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO	144
5.3.2.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO	145
5.3.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM LISBOA	146
5.3.3.1. CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO	146

5.3.3.2. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO	149
5.3.3.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO	152
5.3.3.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO	152
5.3.4. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS	154
5.3.4.1. ANÁLISE COMPARATIVA DO CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO	154
5.3.4.2. ANÁLISE COMPARATIVA DO CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO.....	157
5.3.4.3. ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO	162
5.3.4.4. ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO	164
5.4. CONCLUSÕES.....	166
6. INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO DAS PAREDES E DA VENTILAÇÃO NOTURNA NO CONFORTO E NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	169
6.1. ENQUADRAMENTO.....	169
6.2. INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA FACHADA.....	170
6.2.1. OBJETIVOS.....	170
6.2.2. CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO	170
6.2.3. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO	173
6.2.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO	175
6.2.5. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO	176
6.2.6. CONCLUSÕES.....	177
6.3. INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO PELO INTERIOR DA FACHADA	180
6.3.1. OBJETIVOS.....	180
6.3.2. CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO	180
6.3.3. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO	182
6.3.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO	185
6.3.5. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO	186
6.3.6. CONCLUSÕES.....	186
6.4. INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO NOTURNA.....	188
6.4.1. OBJETIVOS.....	188
6.4.2. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO	188
6.4.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO	191
6.4.4. CONCLUSÕES.....	192

6.5. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO TÉRMICO – INDICADOR DE DESEMPENHO	193
6.5.1. ENQUADRAMENTO	193
6.5.2. CÁLCULO DO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO – COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA FACHADA	194
6.5.2.1. INDICADOR DE DESCONFORTO 'TÉRMICO - INVERNO	195
6.5.2.2. INDICADOR DE DESCONFORTO 'TÉRMICO - VERÃO	197
6.5.3. CÁLCULO DO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO – ISOLAMENTO PELO INTERIOR DA FACHADA	200
6.5.3.1. INDICADOR DE DESCONFORTO 'TÉRMICO - INVERNO	200
6.5.3.2. INDICADOR DE DESCONFORTO 'TÉRMICO - VERÃO	201
6.5.4. CÁLCULO DO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO – VENTILAÇÃO NOTURNA	202
6.5.4.1. INDICADOR DE DESCONFORTO 'TÉRMICO - VERÃO	202
6.5.5. CONCLUSÕES	204
6.6. CONCLUSÕES	207
7. CONCLUSÕES	209
7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	209
7.2. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS	210
7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	212
 BIBLIOGRAFIA	 215
ANEXO I: VERIFICAÇÃO DOS <i>DATA LOGGERS</i> NA CÂMARA CLIMÁTICA DA FEUP	223
ANEXO II: RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO APARTAMENTO-TIPO	227
ANEXO III: ESTUDO DE FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DOS CENÁRIOS EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO	233
ANEXO IV: AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO APARTAMENTO-TIPO	237
ANEXO V: ESTUDO DE FREQUÊNCIAS ACUMULADAS E DE PERCENTIS DE TEMPERATURA DAS SOLUÇÕES PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO DAS PAREDES NO CONFORTO E NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	247
ANEXO VI: ESTUDO DA ENERGIA DE AQUECIMENTO E DE ARREFECIMENTO DAS SOLUÇÕES DE AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO DAS PAREDES E DA VENTILAÇÃO NOTURNA NO CONFORTO E NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	253

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Habitação social em % do setor de arrendamento e do <i>stock</i> habitacional, em 2003 (adaptado de Housing Statistics in European Union, 2004)	11
Figura 2.2 – Fogos de habitação social por 1000 fogos residenciais, em 2012 (adaptado de INE, 2013)	12
Figura 2.3 – Edifícios e fogos de habitação social objeto de obras de conservação e reabilitação (adaptado de INE, 2013)	12
Figura 2.4 – Balanço térmico do corpo humano (adaptado de Silva, 2006)	14
Figura 2.5 – Mecanismo adaptativo (adaptado de Matias, 2010)	16
Figura 2.6 – Oportunidade adaptativa (adaptado de Baker, <i>et al.</i> , 1996)	17
Figura 2.7 – Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média mensal exterior (adaptado de ASHRAE 55, 2010)	19
Figura 2.8 – Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada (verão) (adaptado de EN 15251, 2007)	22
Figura 2.9 – Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada (inverno) (adaptado de EN 15251, 2007)	23
Figura 2.10 – Valores recomendados da temperatura de conforto em função da temperatura média exterior ponderada (adaptado de Matias, 2010)	24
Figura 2.11 – Relação entre os valores médios das temperaturas operativa e do ar (adaptado de Matias, 2010)	25
Figura 2.12 – Atenuação do valor da temperatura operativa de conforto por aumento da velocidade do ar (adaptado de ISO 7730, 2005)	25
Figura 2.13 – Concentração de CO ₂ como indicador da qualidade do ar (adaptado de Pinto, 2000)	27
Figura 2.14 – Consumo de energia final por setor (adaptado de Caracterização Energética Nacional, 2011)	28
Figura 2.15 – Evolução do consumo de energia final e de eletricidade no setor doméstico de 1990 a 2011 (adaptado de Eurostat, 2013)	28
Figura 2.16 – Distribuição do consumo de energia no alojamento, por tipo de uso, em 2010 (adaptado de INE, 2011)	29
Figura 3.1 – Conjunto habitacional de Lordelo – implantação (adaptado de de Freitas, 2007) ..	36
Figura 3.2 – Alçado lateral-tipo	37
Figura 3.3 – Alçado posterior-tipo	37
Figura 3.4 – Alçado principal-tipo	37
Figura 3.5 – Estratégia adotada para o plano de medições	42
Figura 3.6 – Apartamento-Tipo representado no alçado sudoeste do Edifício 14	43

Figura 3.7 – Apartamentos T3 dispostos em prumada, representados no alçado sudoeste do Edifício 14.....	43
Figura 3.8 – Apartamentos de tipologias diversas representados no alçado sudoeste do Edifício 12	44
Figura 3.9 – Apartamentos de tipologias diversas representados no alçado sudoeste do Edifício 14	44
Figura 3.10 – Apartamentos de tipologias diversas representados no alçado nordeste do Edifício 15.....	44
Figura 3.11 – <i>Data Loggers</i> utilizados para registo da temperatura e da humidade relativa.....	45
Figura 3.12 – Analisador da concentração de CO ₂	45
Figura 3.13 – Componentes do sistema Porta Ventiladora adotado	46
Figura 3.14 – Implantação de sensores para medição “completa” do Apartamento-Tipo	47
Figura 3.15 – Localização dos sensores na sala e num dos quartos do Apartamento-Tipo	47
Figura 3.16 – Implantação de sensores para medição reduzida dos apartamentos em prumada de tipologia T3.....	47
Figura 3.17 – Implantação de 3 sensores para medição de “muito curta duração” de apartamentos de tipologia T4.....	48
Figura 3.18 – Implantação de 2 sensores para medição de “muito curta duração” de apartamentos de tipologia T1	48
Figura 3.19 – Localização do sensor de temperatura e humidade relativa no exterior	49
Figura 3.20 – Comparação entre a temperatura do ar medida pela estação meteorológica da FEUP e <i>in situ</i>	50
Figura 3.21 – Comparação entre a humidade relativa medida pela estação meteorológica da FEUP e <i>in situ</i>	50
Figura 3.22 – Identificação dos compartimentos do Apartamento-Tipo (Z1 a Z6).....	51
Figura 3.23 – Variação anual da temperatura do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6 ..	52
Figura 3.24 – Variação da temperatura do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 24 e 31/12	53
Figura 3.25 – Variação da temperatura do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 15 e 22/7	53
Figura 3.26 – Temperatura mínima, máxima e média mensal em Z6, na estação de aquecimento.....	54
Figura 3.27 – Temperatura mínima, máxima e média mensal em Z6, na estação de arrefecimento	55
Figura 3.28 – Curva de frequências acumuladas de temperatura do ar em Z6, na estação de aquecimento.....	55

Figura 3.29 – Curva de frequências acumuladas de temperatura do ar em Z6, na estação de arrefecimento	56
Figura 3.30 – Variação anual da humidade relativa do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6	57
Figura 3.31 – Variação da humidade relativa do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 24 e 31/12	58
Figura 3.32 – Variação da temperatura superficial interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 24 e 31/12	58
Figura 3.33 – Variação da humidade relativa do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 15 e 22/7	59
Figura 3.34 – Curva de frequências acumuladas de humidade relativa em Z6, na estação de aquecimento	59
Figura 3.35 – Curva de frequências acumuladas de humidade relativa em Z6, na estação de arrefecimento	60
Figura 3.36 – Conforto térmico à luz da EN 15251 em Z6, na estação de aquecimento	61
Figura 3.37 – Conforto térmico à luz da EN 15251 em Z6, na estação de arrefecimento	62
Figura 3.38 – Conforto térmico à luz da ASHRAE 55 em Z6, na estação de aquecimento	63
Figura 3.39 – Conforto térmico à luz da ASHRAE 55 em Z6, na estação de arrefecimento	63
Figura 3.40 – Variação anual da concentração de CO ₂ em Z3 (1/3/12 a 28/2/13)	65
Figura 3.41 – Variação anual da concentração de CO ₂ em Z6 (1/3/12 a 28/2/13)	65
Figura 3.42 – Variação anual da concentração de CO ₂ em Z3 (1/3/12 a 28/2/13)	65
Figura 3.43 – Variação anual da concentração de CO ₂ em Z6 (1/3/12 a 28/2/13)	66
Figura 3.44 – Variação da concentração de CO ₂ em Z3, entre 24 e 31/12	67
Figura 3.45 – Variação da concentração de CO ₂ em Z6, entre 15 e 22/7	67
Figura 3.46 – Apartamento selecionado para avaliação da influência do período de medição na temperatura do ar	70
Figura 3.47 – Influência do período de medição na variação da temperatura do ar (inverno) ...	71
Figura 3.48 – Correlação entre $T_i - T_e$ e a $T_{med,e}$ para os 5 períodos de medição (inverno)	71
Figura 3.49 – Influência do período de medição na variação da temperatura do ar (verão)	72
Figura 3.50 – Correlação entre $T_i - T_e$ e a $T_{med,e}$ para os 5 períodos de medição (verão)	73
Figura 3.51 – Apartamentos para avaliação da influência da localização em prumada na temperatura do ar	73
Figura 3.52 – Influência da localização em prumada na variação da temperatura do ar (inverno)	74
Figura 3.53 – Influência da localização em prumada no conforto térmico, em Z6, no inverno ...	74

Figura 3.54 – Influência da localização em prumada na variação da temperatura do ar (verão)	75
Figura 3.55 – Influência da localização em prumada no conforto térmico, em Z6, no verão	76
Figura 3.56 – Localização do apartamento designado por “Empena NW” no Edifício 12	76
Figura 3.57 – Localização dos apartamentos designados por “Empena SE” e “Centro” no Edifício 14	77
Figura 3.58 – Influência do fator de forma na temperatura do ar (inverno)	77
Figura 3.59 – Influência do fator de forma na temperatura do ar (verão)	78
Figura 3.60 – Influência da ocupação na variação da temperatura do ar (inverno)	79
Figura 3.61 – Influência da ocupação na variação da temperatura do ar (verão)	80
Figura 3.62 – Representação gráfica dos valores de q_{50}	83
Figura 3.63 – Representação gráfica dos valores de RPH_{50}	83
Figura 3.64 – Correlação entre T_i e RPH_{50} para o período de inverno	86
Figura 4.1 – Balanço térmico	91
Figura 4.2 – Planta cotada do Apartamento-Tipo	97
Figura 4.3 – Marcação da envolvente do Apartamento-Tipo em planta	98
Figura 4.4 – Marcação da envolvente do Apartamento-Tipo nos alçados do Edifício 14	98
Figura 4.5 – Marcação dos envidraçados do Apartamento-Tipo no alçado SW	98
Figura 4.6 – Marcação dos envidraçados do Apartamento-Tipo no alçado NE	99
Figura 4.7 – Modelo de simulação gráfica do Apartamento-Tipo	99
Figura 4.8 – Modelo de simulação gráfica do Apartamento-Tipo	100
Figura 4.9 – Grelhas de ventilação da cobertura	100
Figura 4.10 – Localização dos sensores de temperatura e humidade relativa no desvão	101
Figura 4.11 – Comparação entre a temperatura do ar medida no exterior e no desvão de cobertura	101
Figura 4.12 – Comparação entre a humidade relativa do ar medida no exterior e no desvão da cobertura	102
Figura 4.13 – Fluxograma de dados para modelos de simulação higratérmica (adaptado de Delgado, <i>et al.</i> , 2010)	104
Figura 4.14 – Ajuste da curva de adsorção higroscópica do reboco	106
Figura 4.15 – Modelo de distribuição dos fluxos de ar	108
Figura 4.16 – Coeficientes de pressão do vento nas fachadas	109
Figura 4.17 – Variação anual da temperatura do ar interior em Z1 (simulação versus experimentação)	117
Figura 4.18 – Variação anual da diferença de temperatura do ar em Z1 (simulação versus experimentação)	117

Figura 4.19 – Variação anual da temperatura do ar interior em Z3 (simulação versus experimentação).....	118
Figura 4.20 – Variação anual da diferença da temperatura do ar em Z3 (simulação versus experimentação).....	118
Figura 4.21 – Variação anual da temperatura do ar interior em Z6 (simulação versus experimentação).....	119
Figura 4.22 – Variação anual da diferença da temperatura do ar em Z6 (simulação versus experimentação).....	119
Figura 4.23 – Comparação entre a média da temperatura do ar em Z1, Z3 e Z6 (simulação versus experimentação).....	120
Figura 4.24 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z1 (simulação versus experimentação).....	122
Figura 4.25 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z3 (simulação versus experimentação).....	122
Figura 4.26 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z6 (simulação versus experimentação).....	123
Figura 4.27 – Comparação entre a temperatura média em Z1, Z3 e Z6 (simulação versus experimentação).....	125
Figura 4.28 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z1 (simulação versus experimentação).....	127
Figura 4.29 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z3 (simulação versus experimentação).....	127
Figura 4.30 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z6 (simulação versus experimentação).....	128
Figura 5.1 – Esquema em árvore para estudo de sensibilidade – zona climática I ₂	133
Figura 5.2 – Identificação dos cenários condicionantes no esquema em árvore	134
Figura 5.3 – Análise para os 7 cenários condicionantes, incluindo os cenários PosReab e PreReab (inverno).....	135
Figura 5.4 – Análise para os 7 cenários condicionantes, incluindo os cenários PosReab e PreReab (verão).....	136
Figura 5.5 – Ilustração do princípio de cálculo da energia de aquecimento e de arrefecimento.....	138
Figura 5.6 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento (Porto).....	139
Figura 5.7 – Curva de frequências acumuladas de temperatura na estação de aquecimento (Porto)	140
Figura 5.8 – Temperatura mínima mensal na estação de aquecimento (Porto).....	141
Figura 5.9 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento (Porto)	141
Figura 5.10 – Curva de frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Porto)	142

Figura 5.11 – Temperatura máxima mensal na estação de arrefecimento (Porto).....	144
Figura 5.12 – Valores mensais da energia de aquecimento, no inverno, nas Categorias II e III (Porto)	144
Figura 5.13 – Valores mensais da energia de arrefecimento, no verão, nas Categorias II e III (Porto)	145
Figura 5.14 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento (Lisboa).....	147
Figura 5.15 – Curva de frequências acumuladas de temperatura na estação de aquecimento (Lisboa)	148
Figura 5.16 – Temperatura mínima mensal na estação de aquecimento (Lisboa).....	149
Figura 5.17 – Conforto Térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento (Lisboa)	149
Figura 5.18 – Curva de frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Lisboa)	150
Figura 5.19 – Temperatura máxima mensal na estação de arrefecimento (Lisboa).....	151
Figura 5.20 – Valores mensais da energia de aquecimento, no inverno, nas Categorias II e III (Lisboa)	152
Figura 5.21 – Valores mensais da energia de arrefecimento, no verão, nas Categorias II e III (Lisboa)	153
Figura 5.22 – Comparação da percentagem de desconforto térmico de inverno (Cat. III)	154
Figura 5.23 – Representação gráfica do desconforto térmico de inverno (Cat. III)	155
Figura 5.24 – Comparação das percentagens de desconforto térmico de inverno (Cat. II)	155
Figura 5.25 – Representação gráfica do desconforto térmico de inverno (Cat. II)	156
Figura 5.26 – Comparação dos valores de T_{10} no inverno	156
Figura 5.27 – Representação gráfica do valor de T_{10} no inverno	157
Figura 5.28 – Comparação dos valores do desconforto térmico de verão (Cat. III)	158
Figura 5.29 – Representação gráfica do desconforto térmico de verão (Cat. III)	158
Figura 5.30 – Comparação dos valores do desconforto térmico de verão (Cat. II)	159
Figura 5.31 – Representação gráfica do desconforto térmico de verão (Cat. II)	159
Figura 5.32 – Comparação dos valores das frequências acumuladas de temperatura ($T_i=27^{\circ}\text{C}$).	160
Figura 5.33 – Comparação dos valores das frequências acumuladas de temperatura ($T_i=26^{\circ}\text{C}$).	160
Figura 5.34 – Comparação dos valores de T_{90} no verão	161
Figura 5.35 – Representação gráfica do valor de T_{90} no verão	162
Figura 5.36 – Comparação dos valores da energia de aquecimento no inverno (Cat. III).....	162

Figura 5.37 – Representação gráfica do valor da energia de aquecimento no inverno (Cat. III)....	163
Figura 5.38 – Comparação dos valores da energia de aquecimento no inverno (Cat. II).....	163
Figura 5.39 – Representação gráfica do valor da energia de aquecimento no inverno (Cat. II)	164
Figura 5.40 – Comparação dos valores da energia de arrefecimento no verão (Cat. III).....	164
Figura 5.41 – Representação gráfica do valor da energia de arrefecimento no verão (Cat. III)	165
Figura 5.42 – Comparação dos valores da energia de arrefecimento no verão (Cat. II).....	166
Figura 5.43 – Representação gráfica do valor da energia de arrefecimento no verão (Cat. II)	166
Figura 6.1 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento – 4 soluções de U	171
Figura 6.2 – Temperatura mínima mensal na estação de aquecimento – 4 soluções de U	173
Figura 6.3 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – 4 soluções de U	173
Figura 6.4 – Correlação entre a energia de aquecimento e o coeficiente de perdas por unidade de volume.....	180
Figura 6.5 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento – Isolamento pelo interior.....	181
Figura 6.6 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – Isolamento pelo interior.....	183
Figura 6.7 – Temperatura máxima mensal na estação de arrefecimento – Isolamento pelo interior.....	185
Figura 6.8 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – Ventilação noturna.....	189
Figura 6.9 – Curvas de frequências acumuladas na estação de arrefecimento – Ventilação noturna.....	190
Figura 6.10 – Temperatura máxima mensal na estação de arrefecimento – Ventilação noturna...	191
Figura 6.11 – Correlação entre a energia de arrefecimento e a taxa de renovação de ar para ventilação noturna.....	193
Figura 6.12 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução “S/ Isol.”.	195
Figura 6.13 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução “4cm XPS” ...	196
Figura 6.14 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução “8cm XPS” ...	196

Figura 6.15 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução “12cm XPS” .	197
Figura 6.16 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “S/ Isol.”	198
Figura 6.17 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “4cm XPS”	198
Figura 6.18 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “8cm XPS”	199
Figura 6.19 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “12cm XPS”	200
Figura 6.20 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução. “4cm XPS Isol.Int”	201
Figura 6.21 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “4cm XPS Isol.Int”	202
Figura 6.22 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “Sem Vent. Noturna”	203
Figura 6.23 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “Com Vent. Noturna”	203
Figura 6.24 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de inverno – 4 soluções de U	204
Figura 6.25 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de verão – 4 soluções de U	205
Figura 6.26 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de inverno – Isolamento pelo interior	205
Figura 6.27 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de verão – Isolamento pelo interior	206
Figura 6.28 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de verão – Ventilação noturna	206

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Taxa de metabolismo em função da atividade (adaptado de ISO 7730, 2005)	15
Quadro 2.2 - Resistência térmica do vestuário (adaptado de ISO 7730, 2005)	15
Quadro 2.3 - Descrição das categorias de conforto especificadas (adaptado de EN 15251, 2007)	21
Quadro 2.4 - Largura de banda por categoria de conforto (adaptado de EN 15251, 2007)	22
Quadro 3.1 - Metodologia utilizada na medição	36
Quadro 3.2 - Tipologia dos apartamentos	37
Quadro 3.3: Soluções construtivas originais	38
Quadro 3.4: Soluções construtivas implementadas (adaptado de de Freitas, 2007)	40
Quadro 3.5 - Metodologia adotada no plano de medições	43
Quadro 3.6 - Temperatura mínima, máxima e média para a estação de aquecimento (Z1, Z3 e Z6)	54
Quadro 3.7 - Temperatura mínima, máxima e média para a estação de arrefecimento (Z1, Z3 e Z6)	54
Quadro 3.8 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de aquecimento (Z1, Z3 e Z6)	56
Quadro 3.9 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Z1, Z3 e Z6)	56
Quadro 3.10 - Frequências acumuladas de humidade relativa na estação de aquecimento (Z1, Z3 e Z6)	60
Quadro 3.11 - Frequências acumuladas de humidade relativa na estação de arrefecimento (Z1, Z3 e Z6)	60
Quadro 3.12 - Conforto térmico à luz da EN 15215, para Z1, Z3 e Z6, na estação de aquecimento	61
Quadro 3.13 - Conforto térmico à luz da EN 15215, para Z1, Z3 e Z6, na estação de arrefecimento	62
Quadro 3.14 - Conforto térmico à luz da ASHRAE 55, para Z1, Z3 e Z6, na estação de aquecimento	63
Quadro 3.15 - Conforto térmico à luz da ASHRAE 55, para Z1, Z3 e Z6, na estação de arrefecimento	64
Quadro 3.16 - Concentrações de CO ₂ (período de ocupação versus período de medição)	66
Quadro 3.17 - Metodologia adotada no estudo de variabilidade	70
Quadro 3.18 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para os 5 períodos de medição – inverno ..	71
Quadro 3.19 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para os 5 períodos de medição – verão	72

Quadro 3.20 - Frequências acumuladas de T_i , em Z6, para os 3 apartamentos em prumada – inverno	74
Quadro 3.21 - Conforto térmico à luz da EN 15251, em Z6, para os 3 apartamentos em prumada – inverno	75
Quadro 3.22 - Frequências acumuladas de T_i , em Z6, para os 3 apartamentos em prumada – verão	75
Quadro 3.23 - Conforto térmico à luz da EN 15251, em Z6, para os 3 apartamentos em prumada – verão	76
Quadro 3.24 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para 3 apartamentos num alinhamento horizontal – inverno	77
Quadro 3.25 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para 3 apartamentos em alinhamento horizontal – verão.....	78
Quadro 3.26 - Ocupação dos 6 apartamentos medidos.....	79
Quadro 3.27 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para 6 apartamentos com diferente ocupação – inverno	79
Quadro 3.28 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para 6 apartamentos com diferente ocupação – verão	80
Quadro 3.29 - Resultados de medição do ensaio de permeabilidade ao ar dos 25 apartamentos	82
Quadro 3.30 - Estudo estatístico dos parâmetros Rph_{50} e q_{50} (A).....	84
Quadro 3.31 - Temperatura do ar interior, T_i , na sala versus Rph_{50}	85
Quadro 4.1 - Dados climáticos contidos num ficheiro climático <i>EPW</i> (adaptado de <i>EnergyPlus</i> , 2008)	95
Quadro 4.2 - Parâmetros de localização do edifício.....	103
Quadro 4.3 - Principais propriedades higrotérmicas dos materiais (adaptado de Ramos, <i>et al.</i> , 2009)	104
Quadro 4.4 - Caraterização dos materiais opacos	105
Quadro 4.5 - Cálculo da espessura da camada superficial de reboco, δ_M	105
Quadro 4.6 - Caraterização dos elementos envidraçados	106
Quadro 4.7 - Caraterização da proteção solar	106
Quadro 4.8 - Ganhos internos de ocupação (adaptado de Canha, <i>et al.</i> , 2009)	110
Quadro 4.9 - Taxa metabólica para diferentes atividades (adaptado de ISO 7730, 2005).....	110
Quadro 4.10 - Ganhos internos de equipamento (adaptado de Canha, <i>et al.</i> , 2009)	110
Quadro 4.11 - Ganhos internos típicos (adaptado de Canha, <i>et al.</i> , 2009)	111
Quadro 4.12 - Ganhos internos na estação de aquecimento	111
Quadro 4.13 - Ganhos internos na estação de arrefecimento.....	112

Quadro 4.14 - Perfil diário de ocupação.....	112
Quadro 4.15 - Perfil diário de iluminação	114
Quadro 4.16 - Perfil diário de ativação das proteções solares (inverno)	115
Quadro 4.17 - Perfil diário de ativação das proteções solares (verão)	115
Quadro 4.18 - Estudo dos valores médios, máximos e mínimos para o inverno (simulação versus experimentação).....	121
Quadro 4.19 - Estudo das frequências acumuladas para o inverno (simulação versus experimentação).....	124
Quadro 4.20 - Estudo dos valores médios, máximos e mínimos para o verão (simulação versus experimentação).....	126
Quadro 4.21 - Estudo das frequências acumuladas para o verão (simulação versus experimentação).....	129
Quadro 5.1 - Parâmetros considerados nos cenários de simulação e respetivos valores	132
Quadro 5.2 - Valor dos parâmetros para os 7 cenários condicionantes (zona climática I ₂).....	135
Quadro 5.3 - Cenários selecionados para avaliação do conforto térmico e da eficiência energética.....	137
Quadro 5.4 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento (Porto).....	139
Quadro 5.5 - Percentis de temperatura na estação de aquecimento (Porto)	140
Quadro 5.6 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento (Porto)	142
Quadro 5.7 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Porto).....	142
Quadro 5.8 - Percentis de temperatura na estação de arrefecimento (Porto).....	143
Quadro 5.9 - Valores mensais da energia de aquecimento no inverno (Porto).....	145
Quadro 5.10 - Valores mensais da energia de arrefecimento no verão (Porto)	146
Quadro 5.11 - Conforto térmico à luz da EN 15215 na estação de aquecimento (Lisboa).....	147
Quadro 5.12 - Percentis de temperatura na estação de aquecimento (Lisboa)	148
Quadro 5.13 - Conforto térmico à luz da EN 15215 na estação de arrefecimento (Lisboa)	150
Quadro 5.14 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Lisboa).....	150
Quadro 5.15 - Percentis de temperatura na estação de arrefecimento (Lisboa).....	151
Quadro 5.16 - Valores mensais da energia de aquecimento no inverno (Lisboa).....	152
Quadro 5.17 - Valores mensais da energia de arrefecimento no verão (Lisboa)	153
Quadro 6.1 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento – 4 soluções de U.....	172
Quadro 6.2 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – 4 soluções de U.....	174

Quadro 6.3 - Frequências acumuladas temperatura na estação de arrefecimento – 4 soluções de U	175
Quadro 6.4 - Energia de aquecimento (Categorias III e II) – 4 soluções de U	176
Quadro 6.5 - Energia de arrefecimento (Categorias III e II) – 4 soluções de U	177
Quadro 6.6 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento – Isolamento pelo interior.....	181
Quadro 6.7 - Percentis de temperatura na estação de aquecimento – Isolamento pelo interior	182
Quadro 6.8 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – Isolamento pelo interior.....	183
Quadro 6.9 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento – Isolamento pelo interior	184
Quadro 6.10 - Energia de aquecimento (Categorias III e II) – Isolamento pelo interior.....	185
Quadro 6.11 - Energia de arrefecimento (Categorias III e II) – Isolamento pelo interior	186
Quadro 6.12 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – Ventilação noturna	189
Quadro 6.13 - Percentis e frequências acumuladas na estação de arrefecimento – Ventilação noturna	190
Quadro 6.14 - Energia de arrefecimento (Categorias III e II) – Ventilação noturna.....	191
Quadro 6.15 - Identificação do Indicador de Desconforto Térmico para avaliação da influência do U da fachada	195

SÍMBOLOS

A – área [m^2]

C – trocas convectivas com camadas de ar circundantes [W/m^2]

C_{CO_2} - concentração de CO_2 acima da concentração exterior [ppm]

$\cos i$ – projeção dos raios solares sobre a normal à superfície [-]

C_v – coeficiente de variação de Pearson [%]

c_p – calor específico [$J/kg.^{\circ}C$]

$D_{x,y}^i$ – indicador de desconforto térmico de inverno do cenário x na localização y [$h.^{\circ}C$]

$D_{x,y}^v$ – indicador de desconforto térmico de verão do cenário x na localização y [$h.^{\circ}C$]

E – perdas por evaporação devido à transpiração [W/m^2]

E_{aquec} – energia de aquecimento [kWh/m^2]

E_{arref} – energia de arrefecimento [kWh/m^2]

e – espessura [m]

F_{acum} – frequência acumulada de temperatura [%]

$F_{céu}$ – fator de forma entre a superfície e o céu [-]

F_{solo} – fator de forma entre a superfície e o solo [-]

G – coeficiente de perdas por unidade de volume ($W/m^3.^{\circ}C$),

GD – número de graus-dias de aquecimento do local ($^{\circ}C.dias$)

g – fator solar do envidraçado [-]

$g_{\perp v}$ – fator solar do envidraçado sem proteção solar [-]

$g_{\perp'}$ – fator solar do envidraçado com proteção solar [-]

HR_e – humidade relativa do ar exterior [%]

HR_i, ϕ – humidade relativa do ar interior [%] [-]

HR_{10} – humidade relativa do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 10% [%]

HR_{50} – humidade relativa do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 50% [%]

HR_{90} – humidade relativa do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 90% [%]

h – altura solar [m]

h_i – condutância térmica superficial [$W/m^2.^{\circ}C$]

$h_{x,y}^i$ – número de horas em que a temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, é inferior à temperatura de conforto, no cenário x na localização y [h]

$h_{x,y}^v$ – número de horas em que a temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, é superior à temperatura de conforto, no cenário x na localização y [h]

I_{dh} – intensidade de radiação difusa numa superfície horizontal [W/m^2]

I_{gh} – intensidade de radiação global numa superfície horizontal [W/m^2]

I_i – intensidade de radiação direta numa superfície normal aos raios solares [W/m^2]

$I_{\alpha\beta}$ – intensidade de radiação global numa superfície de azimute α e inclinação β [W/m^2]

K – condução de ou para o vestuário [W/m^2]

L – espessura da camada higroscópica [m]

M – taxa de Metabolismo [W/m^2]

\dot{m} – fluxo de massa [$Kg/m^2.s$]

PD – percentagem de pessoas insatisfeitas [%]

P_{sat} – pressão de saturação [Pa]

Q_{res} – taxa de calor perdido pela respiração [W/m^2]

Q_{sk} – taxa de calor perdido pela pele [W/m^2]

\dot{Q}_{sys} – transferência de calor a partir de sistemas de climatização – output dos sistemas - [kWh]

q_{50} – razão entre o caudal escoado a 50 Pa e a área da envolvente [$m^3/h.m^2$]

R – coeficiente de correlação linear de Pearson [-]

R – trocas por radiação com as superfícies envolventes [W/m^2]

RES – troca de calor sensível e latente na respiração [W/m^2]

RPH – taxa de renovação horária [h^{-1}]

RPH_{50} – taxa de renovação horária a 50 Pa [h^{-1}]

R_{sol} – refletância de radiação solar [%]

R_{vis} – refletância de radiação visível [%]

S – taxa de calor acumulado no corpo humano [W/m^2]

T – temperatura [$^{\circ}C$]

T_{conf} – temperatura de conforto [$^{\circ}C$]

T_e – temperatura do ar exterior [$^{\circ}C$]

T_i – temperatura do ar interior [$^{\circ}C$]

T_{max} – temperatura máxima do ar interior [$^{\circ}C$]

T_{med} – temperatura média do ar interior [$^{\circ}C$]

$T_{med.e}$ – temperatura média do ar exterior [$^{\circ}C$]

T_{mp} – temperatura média exterior ponderada [$^{\circ}C$]

T_{min} – temperatura mínima do ar interior [$^{\circ}C$]

- T_{n-i} – temperatura média exterior do dia (i) anterior [°C]
- T_{oc} – temperatura operativa de conforto [°C]
- T_r – temperatura radiante [°C]
- T_{si} – temperatura superficial interior [°C]
- T_z – temperatura do ar na zona térmica [°C]
- T_{10} – temperatura do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 10% [°C]
- T_{50} – temperatura do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 50% [°C]
- T_{90} – temperatura do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 90% [°C]
- $t_{d,i}$ – temperatura interior de dimensionamento [°C]
- $t_{d,e}$ – temperatura exterior de dimensionamento [°C]
- t_p – período de um ciclo de variação do material [s]
- U – coeficiente de transmissão térmica [W/m².°C]
- U_{cob} – coeficiente de transmissão térmica da cobertura [W/m².°C]
- U_m – valor médio entre o coeficiente de transmissão térmica do envidraçado e o da parede [W/m².°C]
- U_{opaco} – coeficiente de transmissão térmica da fachada opaca [W/m².°C]
- U_{ref} – coeficiente de transmissão térmica de referência [W/m².°C]
- $U_{sem\ isol}$ – coeficiente de transmissão térmica do elemento sem isolamento térmico [W/m².°C]
- $U_{vidro\ simples}$ – coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado com vidro simples [W/m².°C]
- U_{wdn} – coeficiente de transmissão médio dia-noite do vão envidraçado [W/m².°C]
- u – teor de humidade em massa de um material [kg/kg]
- V – volume [m³]
- V_{ar} – velocidade média do ar [m/s]
- W – taxa de trabalho mecânico realizado [W/m²]
- ΔT_{max} – diferença entre a temperatura máxima do ar interior [°C]
- ΔT_{med} – diferença entre a temperatura média do ar interior [°C]
- ΔT_{min} – diferença entre a temperatura mínima do ar interior [°C]
- $\Delta t_{x,y}^i$ – diferenças positivas entre a temperatura de conforto e a temperatura do ar interior, no cenário x na localização y [°C]
- $\Delta t_{x,y}^v$ – diferenças positivas entre a temperatura do ar interior e a temperatura de conforto, no cenário x na localização y [°C]
- ΔT_{10} – diferença entre a temperatura do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 10% [°C]

ΔT_{50} – diferença entre a temperatura do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 50% [°C]

ΔT_{90} – diferença entre a temperatura do ar interior com probabilidade de não ser excedida de 90% [°C]

δ_M – espessura da camada de adsorção [m]

δ_{mat} – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material [kg/(m.s.Pa)]

ξ – capacidade higroscópica específica do material [kg/kg]

θ_{po} – temperatura de ponto de orvalho [°C]

λ – condutibilidade térmica [W/m.°C]

μ – fator de resistência à difusão de vapor [-]

π – permeabilidade ao vapor [kg/m.s.Pa]

ρ – massa volúmica do material [kg/m³]

ρ_{solo} – fração da intensidade de radiação global refletida pelo contorno [%]

τ_{vis} – transmitância de radiação visível [%]

τ_{sol} – transmitância de radiação solar [%]

ABREVIATURAS

ADENE – Agência para a Energia

APA – Agência Portuguesa do Ambient

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

CDH – Contratos de Desenvolvimento de Habitação

CEN – *European Committee for Standardization*

CIBSE – *The Chartered Institution of Building Services Engineers*

CTF – *Conduction Transfer Function*

EMPD – *Effective Moisture Penetration Depth Model*

EN – *European Standards*

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

EPW – *EnergyPlus Weather Files*

ETICS – *External Thermal Insulation Composite System*

FAIH – Fundo de Apoio ao Investimento Habitacional

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FFH – Fundo de Fomento da Habitação

GPL – Gás de Petróleo Liquefeito

HAMT – *Combined Heat and Moisture Transfer*

HCC – Habitação a Custos Controlados

HE-FCP – Habitações Económicas ligado à Federação das Caixas de Previdência

IGAPHE – Instituto de Gestão e Alienação do Património Habitacional do Estado

IHRU – Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana

INE – Instituto Nacional de Estatística

INH – Instituto Nacional da Habitação

INMG – Instituto Nacional Meteorologia e Geofísica

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Changes*

IPPAR – Instituto Português do Património Arquitetónico

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISO – *International Organization for Standardization*

ITE – Informação Técnica de Edifícios

LFC – Laboratório de Física das Construções

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

NE – Nordeste

NiMH – *Nickel-metal Hydride Battery*

NP – Norma Portuguesa

NUTS – Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins Estatísticos

NW – Noroeste

PER – Programa Especial de Realojamento

PMV – *Predicted Mean Vote*

PPD – *Predicted Percentage of Dissatisfied*

QAI – Qualidade do Ar Interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RECRIA – Regime Geral de Participação na Recuperação de Imóveis Arrendados

RECRIPH – Regime Especial de Participação e Financiamento de Prédios Urbanos em Propriedade Horizontal

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

REHABITA - Regime de Apoio à Participação Habitacional em Áreas Antigas

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios

SAAL – Serviço de Apoio Ambulatório Local

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios

SOLARH – Programa de Solidariedade e Apoio à Recuperação de Habitação

SRU – Sociedade de Reabilitação Urbana

SW – Sudoeste

TMY- *Typical Meteorological Year*

UE – União Europeia

XPS – Poliestireno Extrudido

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A habitação social desempenha um papel crucial na satisfação das necessidades de habitação dos estratos sociais mais desfavorecidos. A reconhecida falta de durabilidade e de qualidade dos edifícios destinados a habitação de arrendamento público (Rodrigues, 2008), construídos na sua maior parte nas décadas de 70, 80 e 90, a par da ausência de programas específicos de apoio à sua reabilitação, tem conduzido à sua degradação construtiva, urbana e social.

Nos últimos anos tem-se assistido a um esforço crescente por parte dos municípios na reabilitação. Destacam-se, neste contexto, pela dimensão do parque de habitação que gerem, os municípios de Lisboa e do Porto, que por intermédio das suas empresas municipais (a Gebalis e a DomusSocial, respetivamente), têm reabilitado milhares de fogos (INE, 2011).

É fundamental que os bairros de habitação social apresentem níveis de qualidade que permitam adequadas condições de habitabilidade a quem lá reside, sendo que para o efeito as entidades gestoras desses bairros necessitam de instrumentos que lhes permitam identificar as necessidades de intervenção, e que as apoiem na decisão sobre o tipo de intervenção.

Neste contexto, a reabilitação dos edifícios de habitação social deve ser encarada como um processo de compatibilização de várias condicionantes, designadamente as relacionadas com a eficiência energética do edifício, com o conforto térmico, com o custo global do investimento durante o seu período de vida útil e com a durabilidade das soluções e equipamentos instalados.

A realidade social e económica dos bairros de habitação social em Portugal, onde reside maioritariamente uma população sem práticas de aquecimento e de arrefecimento ambiente, determina a adoção de estratégias de reabilitação térmica e energética passivas que apresentam a prazo menores custos de manutenção, adaptados às condições socioeconómicas da população residente.

Nos últimos 30 anos assistiu-se em Portugal a um crescimento desenfreado da construção de edifícios residenciais, fortemente amortecido desde 2006 (INE, 2011). Este crescimento foi acompanhado pela introdução a níveis muito significativos de equipamentos de aquecimento e de arrefecimento do ar ambiente, o que determinou um incremento considerável dos consumos de energia no setor doméstico (INE, 2011). Os edifícios de habitação social não têm consumos similares aos dos restantes edifícios residenciais. Muito embora não existam estatísticas nacionais referentes ao consumo energético nos edifícios de habitação social, estima-se que o valor dos consumos de energia de aquecimento e de arrefecimento seja claramente inferior aos dos restantes edifícios do setor doméstico.

Os consumos energéticos estimados pela regulamentação térmica aplicável aos edifícios residenciais (RCCTE, 2006; REH, 2013) são valores nominais obtidos segundo padrões típicos admitidos como os médios prováveis, tanto para a temperatura ambiente como para a renovação de ar, pelo que constituem referências estatísticas que não traduzem, na maior parte dos casos, os consumos energéticos reais dos edifícios de habitação, muito menos dos edifícios de habitação social.

Trata-se de uma abordagem completamente desfasada das condições reais de utilização dos edifícios de habitação social, onde as condições nominais implícitas no cálculo dos consumos energéticos regulamentares não se encontram verificadas, dado que as práticas de aquecimento e de arrefecimento ambiente são muito residuais, ou nulas.

Neste contexto, nos edifícios de habitação social torna-se essencial destacar a importância do estudo do conforto térmico dos ocupantes, em detrimento do estudo de questões relacionadas com a energia, dados os escassos consumos energéticos existentes.

Na Tese desenvolvida foram avaliadas as condições de conforto térmico de um conjunto de habitação social recentemente reabilitado, em condições reais de utilização, num regime de avaliação de desempenho em serviço. A avaliação do conforto térmico foi estabelecida com recurso a uma abordagem adaptativa, situação que melhor responde aos padrões de comportamento dos residentes. Pretende-se, com o estudo desenvolvido, demonstrar que podem existir estados de conforto térmico para valores de temperatura distintos das condições nominais de referência preconizadas na regulamentação.

Há muitos estudos de medição isolada de parâmetros de conforto térmico e de consumo energético nos edifícios, mas a relação entre o conforto térmico, o consumo energético e as características da envolvente não tem sido analisada de forma consistente, nem se encontra traduzida na regulamentação.

1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIA

A Tese desenvolvida pretende definir a melhor estratégia de reabilitação passiva de edifícios de habitação social, tendo-se para o efeito procedido à avaliação do conforto térmico de um conjunto de habitação social reabilitado tomado como Caso de Estudo, em condições de serviço, procurando relacioná-lo com o consumo energético existente.

Foi estabelecida uma análise crítica às soluções de reabilitação adotadas, contribuindo-se deste modo para uma abordagem mais racional e sustentável da reabilitação dos edifícios de habitação social. A reabilitação de edifícios de habitação social deve privilegiar medidas de reabilitação térmica e energética que assegurem o conforto térmico dos residentes, com recurso a uma estratégia passiva que minimize os consumos energéticos de aquecimento e de arrefecimento.

Os 4 objetivos primordiais da Tese desenvolvida são os seguintes:

- 1) Caracterização do desempenho térmico em serviço de um conjunto habitacional reabilitado tomado como Caso de Estudo. Foram avaliadas as condições de conforto térmico dos ocupantes dos edifícios em condições correntes de utilização e medida a concentração de CO₂, de um Apartamento-Tipo tomado como referência. O conhecimento do desempenho térmico dos edifícios reabilitados, em serviço, é essencial para se fazer um balanço crítico das soluções adotadas e a partir daí avançar para o segundo objetivo de uma forma sustentada;

- 2) Validação do modelo de simulação numérica utilizado, com base nos resultados de medição, para posterior aplicação em estudos de sensibilidade que visam a avaliação do conforto térmico e da eficiência energética de um conjunto de estratégias de reabilitação;
- 3) Desenvolvimento de uma análise de sensibilidade para um conjunto de 4 cenários de simulação numérica, em 4 localizações geográficas representativas do território nacional, para avaliação da influência das estratégias de reabilitação no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional tomado como Caso de Estudo;
- 4) Desenvolvimento de um indicador de desempenho térmico (Indicador de Desconforto Térmico - $D_{x,y}$) para avaliação da influência do isolamento das paredes de fachada e da ventilação noturna, no conforto térmico, incluindo a representação gráfica das soluções de reabilitação estudadas. Síntese de um conjunto de recomendações a aplicar na reabilitação de paredes de fachada e da ventilação noturna, que visam incrementar o conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios de habitação social, em reabilitações futuras, face aos constrangimentos de carácter económico que limitam drasticamente os custos de reabilitação, no contexto socioeconómico atual.

Para cumprir os 4 objetivos delineados foram estabelecidas um conjunto de tarefas que de seguida se resumem:

- Realizou-se uma campanha experimental de monitorização alargada de um Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional estudado, com a caracterização completa do seu desempenho térmico, através da monitorização em contínuo, ao longo de um ano, da temperatura, da humidade relativa e da concentração de dióxido de carbono. De forma complementar, instrumentou-se um conjunto alargado de 24 apartamentos, no verão e no inverno, ao longo de períodos de medição variáveis;
- Selecionou-se um programa de cálculo numérico em regime dinâmico para avaliação do desempenho térmico do Apartamento-Tipo;
- Implementou-se um modelo computacional do Apartamento-Tipo simulado, criado para desenvolver o estudo de sensibilidade;
- Representou-se graficamente os resultados do estudo de sensibilidade dos cenários de simulação numérica;
- Avaliou-se a influência do isolamento térmico da fachada e da ventilação noturna no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo.

Na sequência do estudo desenvolvido foi possível responder, no final da Tese, às seguintes questões:

- Numa ação de reabilitação da fachada de um edifício de habitação social, onde sabemos serem reduzidas, ou mesmo nulas, as práticas de aquecimento ambiente, qual deverá ser o nível de isolamento térmico da fachada opaca?
- Sempre que numa ação de reabilitação da fachada de um edifício de habitação social não for possível, por questões arquitetónicas, isolar pela face exterior dos paramentos, será que se deve isolar pela sua face interior?
- Será que a ventilação noturna, em regime térmico de verão, se traduz num incremento do conforto térmico dos ocupantes nas 4 localizações representativas do território nacional?

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

A Tese está dividida em 7 capítulos:

- O Capítulo 1 enquadra a Tese desenvolvida, define os seus objetivos primordiais e a estratégia utilizada para os conseguir executar e apresenta uma breve síntese da sua estrutura;
- O Capítulo 2 aborda o Estado da Arte do tema de Tese. Para tal, estabelece-se uma síntese do conhecimento nos seus domínios específicos. Trata-se, em primeiro lugar, o tema da reabilitação de edifícios de habitação social em Portugal, resumindo a sua evolução histórica e apresentando as principais estatísticas nesta matéria. Em segundo lugar, são descritos os modelos de avaliação do conforto térmico adaptativo utilizados e apresentados os requisitos para avaliação da concentração de CO₂. Em terceiro lugar apresentam-se as principais estatísticas relativas à eficiência energética no setor doméstico e estabelece-se uma análise crítica destes valores no contexto dos edifícios de habitação social. Por fim sintetizam-se os principais estudos relevantes no âmbito do tema da Tese;
- O Capítulo 3 descreve detalhadamente o estudo experimental de caracterização do desempenho térmico em serviço, do conjunto habitacional reabilitado, tomado como Caso de Estudo. Começa-se por descrever os objetivos e a metodologia utilizada, seguindo-se uma caracterização detalhada do conjunto habitacional e das soluções construtivas executadas na reabilitação. Tendo como base a medição da temperatura, humidade relativa e a concentração de dióxido de carbono, procede-se à avaliação das condições de conforto térmico de um Apartamento-Tipo tomado como referência, em condições correntes de utilização. De forma complementar avalia-se a variabilidade do desempenho térmico em condições de serviço da amostra instrumentada, para um conjunto diversos de cenários de utilização;
- O Capítulo 4 descreve detalhadamente o estudo de simulação do comportamento térmico em regime dinâmico. Começa-se por descrever os objetivos e a metodologia adotados no estudo de simulação, seguindo-se a seleção do programa de simulação numérica aplicado no estudo de validação do modelo. Descreve-se detalhadamente a construção do ficheiro climático utilizado nas simulações efetuadas, seguido do procedimento de construção do modelo geométrico utilizado e da caracterização exaustiva todos os parâmetros necessários ao desenvolvimento do estudo em regime dinâmico. Por fim estabelece-se uma análise de resultados para validação do modelo, no período de inverno e de verão, e procede-se à sua comparação com os resultados experimentais tratados no Capítulo 3. No final são extraídas conclusões;
- O Capítulo 5 descreve detalhadamente o estudo de sensibilidade desenvolvido para um conjunto de cenários de simulação numérica que traduzem estratégias de reabilitação, em 4 localizações geográficas representativas do território nacional, no inverno e no verão. Para efeito de seleção dos cenários de simulação considerados no estudo de sensibilidade, desenvolve-se, numa fase inicial do Capítulo, um esquema em árvore. De seguida avalia-se o conforto térmico e a eficiência energética do Apartamento-Tipo para os cenários selecionados com base no esquema em árvore, nas 4 localizações geográficas escolhidas. Por fim estabelece-se uma análise comparativa dos resultados de simulação numérica para os 4 locais, procede-se à representação gráfica dos cenários para avaliação das estratégias de reabilitação e extraem-se conclusões;
- O Capítulo 6 descreve detalhadamente o estudo de avaliação da influência do isolamento térmico da fachada e da ventilação noturna, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo, nos 4 locais do território nacional, no inverno e no verão. Na sequência da

avaliação da sua influência, calcula-se o Indicador do Desconforto Térmico de inverno e de verão ($D_{x,y}^i$ e $D_{x,y}^v$, respetivamente) para as soluções estudadas e procede-se à sua representação gráfica no mapa de Portugal. No final define-se um conjunto de recomendações para otimização do isolamento das paredes de fachada e da ventilação noturna, a aplicar em futuras ações de reabilitação de edifícios de habitação social, e são sintetizadas um conjunto de conclusões;

- O Capítulo 7 resume as principais conclusões da Tese e perspectiva-se o desenvolvimento de trabalhos futuros neste domínio de investigação.

2

O ESTADO DA ARTE SOBRE REABILITAÇÃO, CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO SOCIAL

2.1. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO SOCIAL

2.1.1. INTRODUÇÃO

O mercado da reabilitação é muito incipiente em Portugal comparativamente ao mercado europeu (IHRU, 2008). O volume de ampliações, alterações e reconstruções não ultrapassou 4 % do total de fogos intervencionados até ao ano 2000 (IHRU, 2008). Em 2003 Portugal apresentava a mais elevada taxa de produção de edifícios novos na Europa, cerca de 90 % (Euroconstruct, 2005), em que predomina a construção massificada de edifícios residenciais com o recurso indiscriminado aos equipamentos de aquecimento e de arrefecimento ambiente.

A reabilitação urbana tem assumido no contexto europeu uma importância relevante como vetor de gestão do território, contribuindo de forma decisiva para a competitividade local, via melhoria da coesão económica e social dos territórios alvo, sendo o Estado, na maior parte dos países europeus, o principal agente (facilitador/executor/regulamentador) deste segmento da construção civil (IHRU, 2008).

Como conceito, a reabilitação de um edifício é o conjunto de obras que visam adequar e melhorar o seu desempenho funcional, com eventual reorganização do espaço interior, mantendo o esquema estrutural básico e o aspeto exterior original (Carta de Lisboa, 1995; Abrantes, *et al.*, 1999).

De acordo com V.P. de Freitas (2012), entende-se por reabilitação, “as ações de intervenção necessárias e suficientes para dotar determinados edifícios de condições de segurança, funcionalidade e conforto, respeitando sempre a sua arquitetura, nomeadamente a caracterização tipológica e o sistema construtivo”.

De acordo com Vítor Abrantes (2013), a reabilitação de edifícios deve contribuir para a sua sustentabilidade energética, requalificação arquitetónica, regeneração da paisagem urbana e aumento da autoestima dos habitantes.

Para Pina dos Santos (2012), a reabilitação de um edifício é uma intervenção que lhe confere uma qualidade térmica e energética superior à que possuía aquando da sua construção. Em Portugal, os principais objetivos de uma ação de reabilitação deverão centrar-se na melhoria do conforto térmico

passivo, na redução (limitação do crescimento) dos consumos energéticos de aquecimento, de arrefecimento, de águas quentes sanitárias e equipamentos domésticos, na correção de situações anómalas (patologia construtiva e ambiental) e na beneficiação imposta regulamentarmente (Pina dos Santos, 2012).

Para L. Matias (2012), a necessidade de reduzir os consumos energéticos dos edifícios, exige a adoção de medidas de dois tipos. Por um lado, a definição de padrões de conforto térmico mais sustentáveis, que envolvem uma mudança de comportamentos e de atitudes dos utentes e por outro lado, a introdução de medidas de reabilitação térmica e energética adequadas, com vista a assegurar as condições desejadas com custos iniciais, de funcionamento e de manutenção adequados à realidade social e económica existente ou expectável.

Como traço comum às citações dos 4 autores, sublinha-se que a reabilitação de edifícios deve privilegiar a aplicação de medidas que incrementem o conforto térmico dos ocupantes, privilegiando sempre a adoção de soluções passivas. Nesse mesmo sentido, a DGGE (2004) defende que as intervenções nos edifícios residenciais a reabilitar devem realizar-se através do reforço da proteção térmica da sua envolvente, do controlo das infiltrações de ar garantindo, no entanto, um mínimo de renovação de ar e pelo recurso a tecnologias solares passivas.

A Tese em curso centra-se no estudo do conforto térmico e na eficiência energética de edifícios de habitação social reabilitados. As condições socioeconómicas dos residentes, com consumos de energia de aquecimento e de arrefecimento praticamente nulos, tornam imperativa a adoção de uma estratégia de reabilitação que vise o conforto térmico numa perspetiva adaptativa, sem necessidade de recurso a sistemas de aquecimento e de arrefecimento ambiente.

A estratégia de reabilitação deverá ser apoiada num conjunto de regras que procurem as melhores soluções para potenciar as condições de conforto térmico e de eficiência energética de cada espaço (IHRU, 2008). Essas soluções passam, entre outras, pelo estudo da composição das fachadas e coberturas, pela caracterização de vãos, caixilharias e envidraçados, pela seleção dos sistemas e soluções construtivas, de modo a permitir uma redução das necessidades de aquecimento, de arrefecimento, de ventilação mecânica e de iluminação artificial (IHRU, 2008).

2.1.2. A HABITAÇÃO SOCIAL EM PORTUGAL

A promoção de habitação de interesse social apoiada pelo Estado surge formalmente, em Portugal, com a I República, em 1918 (Baptista Coelho, 2004), contudo já no final do século XIX “foi surgindo um novo mercado de arrendamento, constituído por módulos de habitação precários e de dimensões mínimas, sem as mínimas condições de higiene, ocupando terrenos sobranceiros no interior de quarteirões. Foram as ilhas do Porto e os pátios e depois as vilas de Lisboa” (Teotónio Pereira, 1994).

No final do século XIX, início de século XX concretizam-se, em Lisboa, pequenos bairros operários associados a indústrias. A importância urbana do alojamento operário e precário durante esse período é destacado no inquérito realizado às ilhas do Porto, em 1939, onde se contabilizam mais de 1100 ilhas com 13000 casas e mais de 45000 habitantes (17 % da população do Porto, à data) (Teixeira, 1996).

No domínio da promoção filantrópica da habitação destaca-se no Porto, entre 1899 e 1905, a construção de 95 fogos “destinados à população operária ou com fracos recursos económicos”, através de uma parceria entre a Câmara Municipal do Porto e o jornal “O Comércio do Porto”. Do total dos fogos construídos localizam-se 26 em Monte Pedral, 29 em Bonfim/Antas e 40 em Lordelo do Ouro (Pimenta, 2001).

No início do século XX (1914) o município do Porto é pioneiro na construção de habitação de interesse social com apoio público, com a construção de 5 bairros populares ou colónias operárias que integram mais de 300 fogos. Destaca-se a Colónia Antero de Quental (1914) à qual se seguem as colónias de Estevão de Vasconcelos, Viterbo Campos, Manuel Laranjeira e o Bairro do Mercado na Foz do Douro (Teixeira, 1996).

A construção, no decurso da I República, de bairros sociais, arrasta-se até ao início dos anos 30, desenvolvendo-se pequenos edifícios multifamiliares ou unifamiliares, em bandas contínuas ou geminados. (Baptista Coelho, 2004). Como importantes exemplos de bairros sociais edificados neste período destaca-se, no Porto, o Bairro de Sidónio Pais ou Bairro da Arrábida, datado de 1918 (100 fogos) (Teixeira, 1996), apontado como referência na construção de edifícios unifamiliares em bandas e de geminações múltiplas, e o Bloco Duque de Saldanha datado de 1937-1941 (1.^a e 2.^a fase, respetivamente), com um total de 158 fogos, apontado como exemplo de intervenção multifamiliar (Teixeira, 1996).

Dos finais da década de 30 até meados da década de 40, em pleno Estado Novo, impõe-se como modelo de habitação social realizada pelo Estado, os bairros de “casas económicas” constituídos por edifícios unifamiliares geminados. No Porto, os Bairros de casas económicas foram realizados entre 1935 e 1965, iniciando-se com o bairro do Ilhéu e terminando com o bairro do Viso, respetivamente (Pimenta, 2001).

No período pós 2.^a guerra mundial, em 1946, é criado o organismo Habitações Económicas ligado à Federação das Caixas de Previdência (HE-FCP), que desenvolve atividade até 1972. Trata-se do organismo português ligado à habitação de interesse social que mais tempo esteve em atividade (Teotónio Pereira, 1983). Dentre as construção que este organismo promoveu destaca-se, no Porto, o Bairro do Inatel, em Ramalde (década de 50). Este bairro, promovido pelo Estado, é apontado como “a primeira referência às propostas do movimento modernista no âmbito da habitação económica” (Barata, 1998). Destacam-se pelo seu simbolismo o conjunto da Cooperativa o Lar Familiar, perto da Avenida da Boavista (1955), bairro construído em promoção cooperativa e o Bloco do Ouro na Rua de Fernandes Tomás (1951-1954), bairro construído em promoção privada.

A partir de 1956, surge no Porto, o Plano de Salubridade das ilhas do Porto, ao abrigo do qual se construíram até 1971, cerca de 7700 fogos para realojar famílias carenciadas em 13 bairros, donde se destacam, pela sua importância, os Bairros do Bom Sucesso e de Fernão de Magalhães (Pimenta, 2001). No âmbito da habitação apoiada pelo Estado destaca-se pela sua relevância, no Porto, o conjunto do Campo do Luso (1960-1974) e alguns dos edifícios da Pasteleira (Correia Fernandes, 2002).

Para promoção de habitação de interesse social entre as classes mais desfavorecidas é criado em 1969, em Portugal, o Fundo de Fomento da Habitação (FFH), que a partir de 1972 concentra as competências e a capacidade técnica das HE-FCP (Teotónio Pereira, 1983). Os empreendimentos habitacionais promovidos pelo FFH, previstos nos Planos de Fomento (os Planos Integrados), não se iniciaram contudo antes de 1974 (Fonseca Ferreira, 1988). “Os Planos integrados destinavam-se a resolver as carências habitacionais em zonas de desenvolvimento preferencial, exigindo a fixação do emprego” (1973-1978) (Godinho de Almeida, 1998).

No pós-25 de Abril, em 1974, inicia-se o Serviço de Apoio Ambulatório Local (SAAL) que promove o realojamento, no próprio local, de pessoas a viver em situações precárias (Bandeirinha, 2001). Destaca-se no âmbito das promoções SAAL, no Porto, o conjunto da Bouça, iniciado antes de 1974, para uma Associação de Moradores, o conjunto SAAL - Zona das Antas (1976) e o conjunto SAAL – Leal (1977) (Fernandes, *et al.*, 2002).

Tanto o SAAL como os Planos Integrados dependeram do FFH (Baptista Coelho, 2004). Salienta-se ainda como forma de promoção de habitação financiada pelo Estado, o surgimento por todo o país, a partir de 1976, das Cooperativas de Habitação Económica, que assumiram particular importância nas Áreas Metropolitanas de Lisboa e do Porto (Baptista Coelho, 2004).

Em 1982 extingue-se o FFH, substituído pelo Fundo de Apoio ao Investimento Habitacional (FAIH), integrado na gestão de um banco (Crédito Predial Português), o que “ilustra uma clara opção pela redução do papel do Estado e da promoção pública na produção habitacional” (Fonseca Ferreira, 1993).

Em 1984 é criado o Instituto Nacional da Habitação (INH) para financiar projetos de Habitação a Custos Controlados (HCC), assente num quadro recomendativo (Recomendações Técnicas para Habitação Social), destinadas a enquadrar a qualidade da habitação a produzir com o apoio do Estado. A atividade do INH centra-se numa promoção indireta da habitação social através do apoio financeiro e técnico a entidades municipais, cooperativas e privadas. No financiamento da HCC, pelo INH, destacam-se dois períodos distintos: até ao início dos anos 90, marcado pela construção de habitação para venda pelas cooperativas e a partir de 1993, com o Programa Especial de Realojamento (PER) destinado à promoção para arrendamento pelos municípios no âmbito do realojamento de famílias residentes em barracas. A promoção de HCC pelas empresas foi reduzida até ao início da década de 90 (11 %) e com maior representatividade a partir de 1996 (70 a 80 %) motivado pela alteração do enquadramento legal dos Contratos de Desenvolvimento de Habitação (CDH) para promoção privada.

O PER construiu em Portugal, entre 1994 e 2005, mais de 31000 fogos, com maior fulgor para o período entre 1996 e 1999 onde se ultrapassa os 4000 fogos/ano. Entre 2004 e 2005 a construção de habitação social é inferior a 1000 fogos/ano (IHRU, 2008).

A partir de 2003 o INH ganha competências na área da conservação e reabilitação de imóveis e na gestão de programas de apoio aos jovens no acesso ao mercado de arrendamento (Baptista Coelho, 2004).

Em 1987 é criado o Instituto de Gestão e Alienação do Património Habitacional do Estado (IGAPHE) com o propósito de gerir, conservar e alienar o património habitacional recebido do FFH (cerca de 40000 fogos) (Afonso, 2004). A alienação do património do IGAPHE para as autarquias e de venda aos ocupantes das habitações faz reduzir o património atual do Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana (IHRU) a cerca de 1/3 do seu valor inicial, sendo 1/4 dos fogos vendido aos ocupantes e o restante atribuído às autarquias (IHRU, 2008). Em 1997 o Estado transfere as competências do IGAPHE no domínio do realojamento para o INH e em 2002 são transferidas todas as atribuições e competências do IGAPHE para o INH (Baptista Coelho, 2004).

A degradação dos imóveis arrendados e as deficientes condições de habitabilidade das famílias residentes motivou a criação, em 1987, do Regime Especial de Comparticipação na Recuperação de Imóveis Arrendados (RECRIA), dinamizado pelo IGAPHE, com comparticipações a fundo perdido e pelo respetivo município (Baptista Coelho, 2004). O RECRIA é um programa apenas vocacionado para a reabilitação de fogos arrendados em edifícios em propriedade vertical, que exclui o apoio à reabilitação em moradias. Foi um programa claramente concebido para as cidades (IHRU, 2008).

O programa RECRIPH (Regime Especial de Comparticipação e Financiamento de Prédios Urbanos em Propriedade Horizontal), criado em 1996, prevê um apoio financeiro a obras em edifícios de propriedade horizontal, nos espaços comuns. O programa SOLARH (Programa de Solidariedade e Apoio à Recuperação de Habitação) é criado em 1999 e alterado em 2001, visando, quando concebido originalmente, o apoio a pequenas obras de conservação em habitações de proprietários idosos e em

agregados de fracos recursos. (Baptista Coelho, 2004). A alteração introduzida em 2001 alarga a elegibilidade do SOLARH aos fogos devolutos (IHRU, 2008).

Em 1996 o RECRUA é alargado à reabilitação de áreas urbanas antigas. O REHABITA (Regime de Apoio à Comparticipação Habitacional em Áreas Antigas) distingue-se dos 3 pela escala de intervenção, a nível urbanístico e pelo tipo de intervenção, a nível municipal.

O Regime Jurídico Excecional de Reabilitação Urbana de Zonas Históricas e de Áreas Críticas de Recuperação e Reconversão Urbanística que cria as Sociedades de Reabilitação Urbana (SRU), em 2004, não disponibiliza qualquer apoio financeiro, constituindo sobretudo um enquadramento jurídico e institucional da intervenção pública municipal em matéria de reabilitação urbana (IHRU, 2008).

A fusão do IGAPHE com o INH tornou, desde 2003, a gestão e dinamização destes programas uma competência do INH (Baptista Coelho, 2004).

Desde 2004 as SRU's vêm racionalizando recursos destinados à reabilitação urbana, promovendo o desenvolvimento de processo de reabilitação integrada. Em 2012, existiam 13 SRU'S (INE, 2013).

Apesar da diversidade de programas e de instituições que operam no setor, refere-se que Portugal tem um valor reduzido de fogos de habitação social, que se traduz na existência de apenas cerca de 2.02 % de fogos de habitação social no total de alojamentos familiares (INE, 2011), que correspondem, no entanto, a 14.34 % dos alojamentos arrendados (INE, 2011). Em comparação com os restantes países europeus (Figura 2.1), o mercado da habitação social em Portugal é muito incipiente. Por exemplo, na Holanda, a habitação social representa 35 % do parque habitacional e 77 % dos alojamentos arrendados (IHRU, 2008).

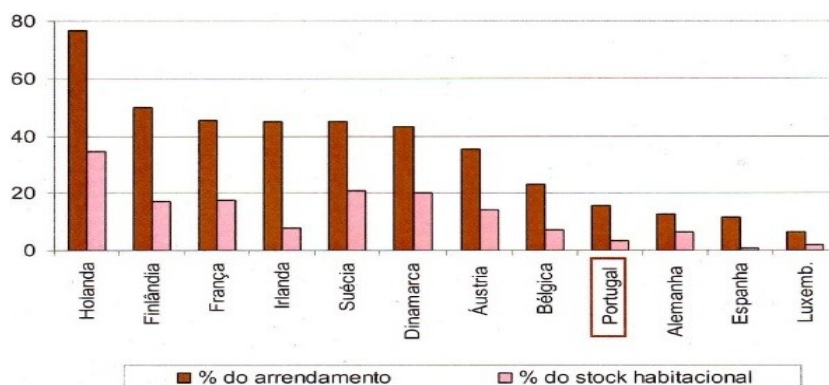


Figura 2.1 – Habitação social em % do setor de arrendamento e do *stock* habitacional, em 2003 (adaptado de IHRU, 2008)

2.1.3. CARATERIZAÇÃO ATUAL DA HABITAÇÃO SOCIAL

De acordo com Priemus (1997) a habitação social caracteriza-se por ser produzida com recurso a financiamento estatal, subsidiada pelos governos nacionais, administrada por autoridades locais ou organizações sem fins lucrativos, com condições de funcionamento reguladas publicamente, sujeitas a rendas inferiores às do mercado e destinadas a famílias de baixos rendimentos.

Em 2012 existiam, em Portugal, cerca de 118 mil fogos de habitação social distribuídos por 24,5 mil edifícios, localizados em 268 municípios. Mais de metade (53,9 %) dos edifícios possuía 2 ou mais alojamentos, conduzindo a um rácio de 4,8 fogos por edifício. Os fogos de habitação social encontravam-se quase exclusivamente (95,5 %) ocupados em regime de arrendamento, cerca de 4,1 % estavam vagos e 0.4 % ocupados ilegalmente (INE, 2013).

A Figura 2.2 representa o número de fogos de habitação social por 1000 fogos residenciais, distribuídos pelas regiões do território nacional (NUTS II – 2012). De acordo com as estimativas do Parque Habitacional (INE, 2013), em 2012, existiam em Portugal 20 fogos de habitação social por 1000 fogos residenciais, com predomínio para a Madeira (42 por 1 000 fogos residenciais), seguida por Lisboa (35), Açores (23) e o Norte (22).

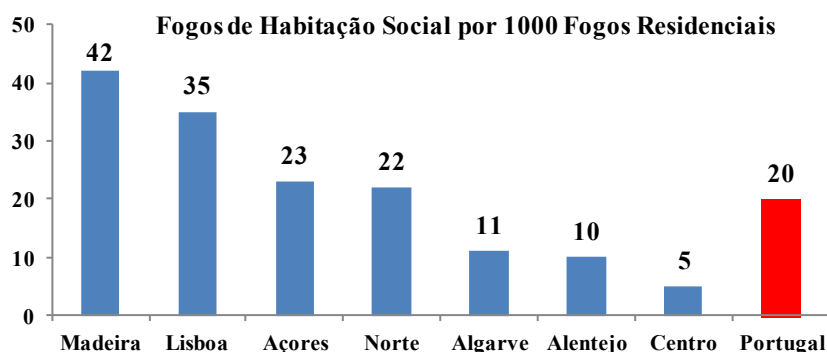


Figura 2.2 – Fogos de habitação social por 1000 fogos residenciais, em 2012 (adaptado de INE, 2013)

Os municípios e as outras entidades proprietárias e gestoras de habitação social realizaram, em 2012, obras de conservação em 8.8% do total dos edifícios e obras de reabilitação de fogos em apenas 4,4 % dos mesmos. Estes valores representam uma redução face a 2011 (11.9 % dos edifícios e 7.7 % dos fogos).

No que respeita aos fogos de habitação social objeto de reabilitação, o Norte apresentou o maior número de fogos intervencionados (2927 fogos) que correspondeu igualmente à maior proporção (7,1%) face ao número de fogos de habitação social existente na região (Figura 2.3).

O desinvestimento na reabilitação da habitação social está certamente relacionada com a crise que Portugal atravessa, bem como a do setor da habitação em particular.

Região (NUTS II)	Edifícios que sofreram obras conservação		Fogos que foram objeto reabilitação	
	n.º	%	n.º	%
Portugal (2011)	3000	11.9	9073	7.7
Portugal (2012)	2158	8.8	5247	4.4
Norte	376	8.0	2927	7.1
Centro	361	12.5	449	5.7
Lisboa	470	5.1	1025	2.0
Alentejo	245	9.1	276	6.1
Algarve	148	11.5	190	4.3
Açores	169	7.6	104	4.1
Madeira	389	25.9	276	5.0

Figura 2.3 – Edifícios e fogos de habitação social objeto de obras de conservação e reabilitação (adaptado de INE, 2013)

As receitas do parque de habitação social totalizaram, em 2012, cerca de 81 milhões de euros. A maior proporção correspondeu à cobrança de rendas (81,9 %), sendo o restante resultante da venda de fogos. As despesas associadas ao parque de habitação social, relacionadas com obras de conservação e/ou reabilitação e os encargos fixos, totalizaram, em 2012, cerca de 57 milhões de euros, sendo a maior proporção referente às despesas efetuadas com obras (84,3 %) (INE, 2013).

Em 2012, a receita média anual por fogo, considerando as rendas cobradas e a venda de fogos, foi de 682 euros. Por outro lado, a despesa média por fogo, considerando as despesas com obras e os encargos fixos, foi de 480 euros (INE, 2013). O saldo anual por fogo foi favorável ao Estado num valor de 202 euros.

2.1.4. SÍNTESE

Os bairros de habitação social são ocupados maioritariamente por uma população residente constituída por famílias com baixos recursos, idosos e desempregados. Neste contexto socioeconómico, a reabilitação dos edifícios deve possibilitar que os níveis de conforto térmico sejam atingidos preferencialmente sem recurso a sistemas mecânicos de aquecimento e de arrefecimento ambiente. Para tal será necessário apostar em estratégias de intervenção sustentáveis, de custo reduzido, que permitam melhorar a eficiência energética dos edifícios a reabilitar.

A escassez de recursos públicos tem feito reduzir, nos últimos anos, o número de edifícios e de fogos de habitação social reabilitados (INE, 2013). Em face de um cenário futuro, que se prevê de contenção de gastos na reabilitação de edifícios sob a alçada do Estado e dos municípios, será necessário definir uma metodologia de intervenção que priorize, pela sua eficiência, um conjunto de soluções construtivas em detrimento de outras de menor eficácia. Para tal é preciso estabelecer uma análise crítica às estratégias de reabilitação a adotar, estudando a influência relativa das diversas soluções, no conforto térmico e na eficiência energética dos edifícios.

2.2. ABORDAGEM ADAPTATIVA DO CONFORTO TÉRMICO

2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

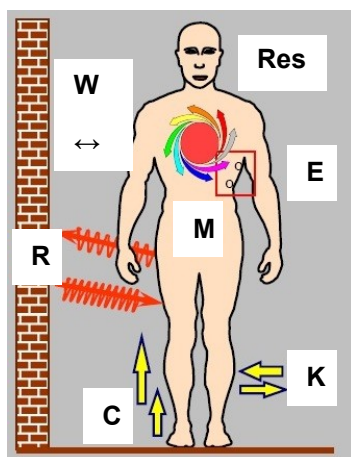
O conforto térmico proporcionado pelos edifícios aos seus ocupantes constitui uma medida do seu desempenho e consequentemente da qualidade do seu ambiente interior. A sua tradução física não é linear, pois não pressupõe a manutenção de uma temperatura exata num determinado ambiente interior, constante ao longo do tempo. Depende de fatores quantificáveis (fatores ambientais e de ocupação) e de fatores não quantificáveis (fatores individuais de natureza psicológica e sociológica).

O corpo humano possui mecanismos de controlo das trocas de calor com o ambiente envolvente, sendo o hipotálamo o centro de controlo que regula o caudal sanguíneo e a intensidade da transpiração a partir da temperatura interior, de forma a igualar a energia produzida no interior do corpo com as perdas térmicas para o exterior. Este mecanismo apenas funciona para um dado limite de condições exteriores, pelo que a exposição a temperaturas extremas durante um largo período de tempo, inibe a capacidade de resposta (temperaturas interiores do corpo humano inferiores a 28 °C, determinam sérios problemas cardíacos e de arritmia, e acima de 46 °C determinam danos cerebrais irreversíveis) (ASHRAE, 2005).

A homeotermia traduz-se pela manutenção da temperatura interna corporal num intervalo bastante apertado, pelo que o balanço térmico com o ambiente interior ganha particular relevo. Em regime de livre variação da temperatura do ar interior, qualquer alteração de temperatura determina um dispêndio adicional de esforço biológico para recuperação da condição homeotérmica, acentuando-se a sensação de desconforto e fadiga, com consequências negativas para a saúde e rendimento do indivíduo (Frota, *et al.*, 1987). O controlo térmico permite garantir condições ambientais interiores que reduzam ao mínimo a necessidade do corpo utilizar os seus mecanismos de regulação térmica (ASHRAE, 2005).

2.2.2. BALANÇO TÉRMICO

O corpo humano estabelece trocas térmicas com o ambiente que o envolve, conforme representado na Figura 2.4 (Silva, 2006).



- Res – Troca de calor sensível e latente na respiração
- E – Perdas por evaporação devido à transpiração
- C – Trocas convectivas com as camadas de ar circundantes
- W – Trabalho mecânico exterior
- M - Produção de calor metabólico
- K – Condução de ou para o vestuário
- R – Trocas por radiação com as superfícies envolventes

Figura 2.4 – Balanço térmico do corpo humano (adaptado de Silva, 2006)

As trocas de calor sensível por condução, convecção e radiação entre o corpo humano e as superfícies envolventes ou o ar que o rodeia, estão associadas a fenômenos de transferência de calor determinados por variação de temperatura, enquanto as trocas de calor latente por respiração e evaporação da pele estão associadas a fenômenos de transferência de massa associados à produção de vapor de água e consequente mudança de fase.

A atividade metabólica do organismo resulta da soma das trocas de calor sensível com as trocas de calor latente. A neutralidade térmica é atingida quando a taxa de produção de calor iguala a taxa de calor cedida ao ambiente envolvente. A sensação de conforto térmico está pois associada a um estado de neutralidade térmica, condicionada por fatores ambientais, individuais e mecanismos de adaptação fisiológica.

O balanço térmico entre o corpo humano e o ambiente que o rodeia, atendendo aos aspetos fisiológicos, é traduzido, conforme proposto por Fanger (Fanger, 1970), pela Equação 2.1:

$$S = (M - W) - (Q_{sk} + Q_{res}) \quad (2.1)$$

em que

S : Taxa de calor acumulado no corpo humano - $[W/m^2]$

M : Taxa de metabolismo - $[W/m^2]$

W : Taxa de trabalho mecânico realizado - $[W/m^2]$

Q_{sk} : Taxa total de calor perdido pela pele - $[W/m^2]$

Q_{res} : Taxa total de calor perdido pela respiração - $[W/m^2]$

As taxas de metabolismo adotadas são valores médios registados em ensaios fisiológicos, de acordo com o expresso no Quadro 2.1 constante do Anexo B da norma ISO 7730 (ISO, 2005) para um conjunto de atividades típicas.

Quadro 2.1 - Taxa de metabolismo em função da atividade (adaptado de ISO 7730, 2005)

Atividade	Metabolismo Energético	
	[W/m ²]	[met]
Repouso, deitado	46	0.8
Repouso, sentado	58	1.0
Atividade sedentária	70	1.2
Atividade ligeira	93	1.6
Atividade média	116	2.0
Caminhada em terreno plano:		
2 Km/h	110	1.9
3 Km/h	140	2.4
4 Km/h	165	2.8
5 Km/h	200	3.4

Nota: 1 met = 58,15 W/m², área média do corpo humano A = 1,75 m²

A resistência térmica do vestuário adotada está de acordo com o expresso no Quadro 2.2 constante do Anexo C da norma ISO 7730 (ISO, 2005).

Quadro 2.2 - Resistência térmica do vestuário (adaptado de ISO 7730, 2005)

Tipo de vestuário	Resistência Térmica	
	[m ² °C/W]	[clo]
Nu	0	0
Calções	0.1	0.016
Vestuário tropical	0.3	0.047
Vestuário leve, de verão	0.5	0.078
Vestuário de trabalho	0.7	0.124
Vestuário de inverno	1.0	0.155
Fato completo	1.5	0.233

1 clo = 0.155 m² °C/W

O balanço térmico expresso na Equação 2.1 é uma função que depende de variáveis ambientais, como a temperatura do ar interior, a temperatura radiante média do contorno, a velocidade e a humidade relativa do ar e de variáveis relacionadas com a ocupação, como o nível de atividade e o tipo de vestuário. Nos casos em que as variáveis ambientais conduzam a valores de $S=0$, verifica-se o estado de equilíbrio térmico do corpo associado a uma sensação neutra de conforto.

2.2.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

2.2.3.1. ABORDAGEM ANALÍTICA VERSUS ABORDAGEM ADAPTATIVA

O conforto térmico é definido como a satisfação expressa quanto a um ambiente térmico (ASHRAE, 2005). O equilíbrio térmico e, por conseguinte o conforto térmico, surgem associados ao estado de neutralidade térmica (Fanger, 1970). A neutralidade térmica depende para além dos fatores ambientais e relacionados com o tipo de ocupação, de fatores individuais de natureza psicológica e sociológica, designadamente a idade, o estrato sociocultural, o sexo, a adaptação ecológica às regiões, o estado mental, a educação, os hábitos, fatores de um modo geral difíceis de quantificar (Fanger, 1970).

Os modelos de avaliação do conforto térmico possuem duas abordagens distintas:

- A abordagem analítica é caracterizada pela obtenção de resultados experimentais em câmaras climáticas, onde são ajustadas as variáveis ambientais – temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura das superfícies e humidade do ar – e se procede, depois, ao registo das sensações térmicas experimentadas pelos ocupantes quando sujeitos, no seu interior, a diferentes combinações das ditas variáveis. A análise da equação de balanço térmico do organismo estabelece-se em regime estacionário;
- A abordagem adaptativa é caracterizada pela obtenção de resultados em pesquisas de campo onde as variáveis ambientais são medidas diretamente nos ambientes reais em que as pessoas desenvolvem as suas atividades e se procede à recolha das sensações térmicas dos ocupantes. A análise da equação de balanço térmico do organismo estabelece-se em regime dinâmico, considerando que os ocupantes podem interagir física e psicologicamente com o ambiente térmico que o rodeia.

A principal diferença entre ambas as abordagens reside no facto de na abordagem adaptativa, o ocupante desempenhar um papel decisivo na criação do seu próprio ambiente térmico, interagindo com o meio envolvente, modificando comportamentos e revendo hábitos, e adaptando as suas expectativas às condições ambientais existentes. A perceção térmica do ocupante é influenciada, para além dos fatores relacionados com o balanço térmico do corpo humano (Capítulo 2.2.2) pelos parâmetros climáticos, por condicionamentos sociais, considerações sociais e outros fatores de contexto (Brager, *et al.*, 1998).

De acordo com o representado na Figura 2.5, a abordagem adaptativa preconiza que a obtenção das condições de conforto térmico resulta de um processo dinâmico, no qual o utilizador mantém uma interação física e psicológica com o ambiente, quer através da interação com o edifício e os seus sistemas, quer devido aos seus hábitos sociais e culturais (Matias, 2010).



Figura 2.5 – Mecanismo adaptativo (adaptado de Matias, 2010)

Optou-se, na Tese, pela utilização de uma abordagem adaptativa do conforto térmico. Nos edifícios de habitação social, o papel do residente na interação com o meio ambiente é decisiva para a obtenção do conforto térmico, seja por exemplo, pela abertura de janelas, no verão, ou pela colocação de uma peça adicional de vestuário, no inverno.

2.2.3.2. ADAPTAÇÃO TÉRMICA

Distinguem-se 3 categorias de adaptação térmica (Brager, *et al.*, 1998, De Dear, *et al.*, 1997):

- A adaptação comportamental engloba um conjunto de atitudes que um indivíduo pode estabelecer, de forma ativa, com o meio ambiente envolvente, tendo em vista a manutenção do seu conforto térmico. As atitudes podem ser de natureza individual (alteração de vestuário, da atividade, da postura ou do local de permanência), ambiental (controlo das condições ambientais, abertura e fecho de portas e janelas, ou o acionamento dos dispositivos de sombreamento e dos sistemas de climatização) e cultural (programação de atividades ou adoção de determinados padrões de vestuário);
- A adaptação fisiológica engloba um conjunto de alterações periódicas desenvolvidas pelo mecanismo termorregulador de um indivíduo de modo a conseguir adaptar-se, isto é, a ajustar a resposta do organismo ao ambiente interior. Divide-se em duas categorias: a adaptação genética e a aclimação (Brager, *et al.*, 1998);
- A adaptação psicológica engloba um conjunto de reações desenvolvidas pelo ocupante aos estímulos sensoriais, fortemente condicionada pelas experiências prévias de habituação do ocupante ao ambiente interior, bem como pelas expectativas criadas face ao mesmo (Foutain, *et al.*, 1996).

O conceito de “oportunidade adaptativa”, desenvolvido por Baker e Standeven (Baker, *et al.*, 1996), avalia a possibilidade de desenvolvimento, pelo indivíduo, de uma determinada ação adaptativa (comportamental, fisiológica ou psicológica). De um ponto de vista prático caracteriza-se do seguinte modo: “se ocorre uma mudança tal que provoque desconforto, as pessoas reagem de forma a restaurar o seu conforto” (Baker, *et al.*, 1996).

A Figura 2.6 ilustra o conceito de “oportunidade adaptativa”. A extensão da zona de neutralidade térmica é tanto mais elevada quanto maior for a liberdade de controlo das variáveis de ação adaptativa (comportamental, fisiológica ou psicológica). Sempre que não existe “oportunidade adaptativa” (cenário c) da Figura 2.6), qualquer oscilação da temperatura interior face à zona de neutralidade térmica traduz-se em desconforto térmico.

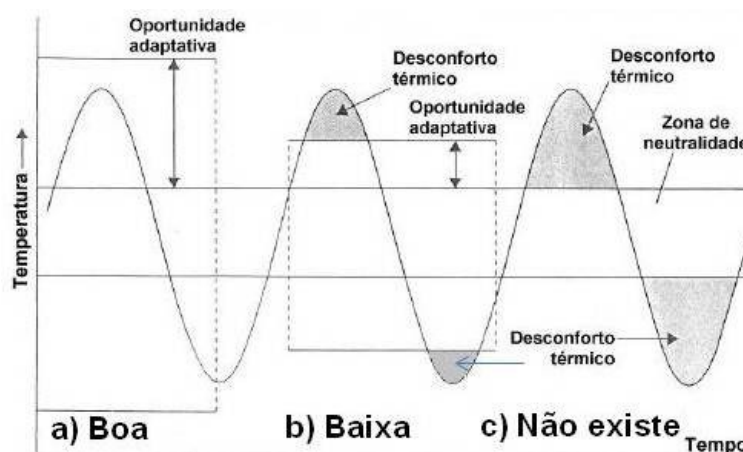


Figura 2.6 – Oportunidade adaptativa (adaptado de Baker, *et al.*, 1996)

A “oportunidade adaptativa” explica o motivo pelo qual os modelos de conforto térmico adaptativo têm zonas de conforto térmico substancialmente maiores, do que as obtidas pelos modelos analíticos (Brager, *et al.*, 1998, Olesen, *et al.*, 2004).

Nos edifícios de habitação social, a “oportunidade adaptativa” é explorada pelos residentes recorrendo a ações adaptativas na procura da manutenção do conforto térmico. Essas ações são sobretudo de natureza comportamental e envolvem uma interação com o meio envolvente.

2.2.4. MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO

Nos Capítulos 2.2.4.2, 2.2.4.3 e 2.2.4.4 apresenta-se uma breve descrição dos modelos de conforto térmico adaptativo que constam das normas ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010), EN 15251 (CEN, 2007), e do modelo disponibilizado pelo LNEC (Matias, 2010).

2.2.4.1. ENQUADRAMENTO

Existem 3 tipos de modelos distintos para quantificar os limites de conforto térmico, baseados na análise estatística do comportamento de um grupo de indivíduos sujeitos a condições ambientais diversas e no estudo dos desvios relativamente ao estado de neutralidade térmica (LNEC, 1985):

- Modelos apoiados em “estudos de condições controladas”, que têm por base ensaios em câmaras climatizadas;
- Modelos “fisiológicos”, estabelecidos tendo como base o balanço térmico do corpo humano;
- Modelos apoiados em “estudos de campo”, estabelecidos em ambientes correntes de utilização. Os modelos de conforto adaptativo enquadram-se nos modelos de “estudo de campo”.

A avaliação do conforto térmico é estabelecida de acordo com a normalização em vigor. Os modelos de conforto adaptativo encontram-se especificados nas normas ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) e EN 15251 (CEN, 2007).

A norma ISO 7730 (ISO, 2005) não contempla nenhum modelo específico para avaliação do conforto térmico adaptativo. No entanto, no seu Capítulo 10, estabelece-se a seguinte referência à possibilidade de aplicação de modelos adaptativos: “o leque de ambientes térmicos considerados aceitáveis alarga-se nas zonas quentes, ou em períodos quentes do ano, nos edifícios que são ventilados de forma natural pelos ocupantes, ou sempre que o ambiente térmico do local é regulado pelos ocupantes, com abertura e fecho de janelas, por exemplo”. A norma refere ainda que “estudos experimentais revelam que os ocupantes desses edifícios são suscetíveis de poder aceitar temperaturas do ar interior de valor superior às previstas pelo índice PMV”.

Disponos, em Portugal, de um modelo adaptativo desenvolvido pelo LNEC (Matias, 2010) para definição do conforto térmico em edifícios do nosso país. Neste modelo, o índice de conforto térmico determinado engloba a influência de parâmetros objetivos (ambientais) e subjetivos (perceção térmica) obtidos em estudos de campo e complementados por tratamento de carácter sociológico.

2.2.4.2. MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO – ASHRAE 55

A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) inclui um modelo adaptativo de avaliação do conforto térmico representado graficamente na Figura 2.7. A sua aplicação está restringida a edifícios condicionados naturalmente, onde os seus ocupantes podem livremente adaptar o seu vestuário às condições ambientes interiores ou exteriores (ASHRAE, 2010).

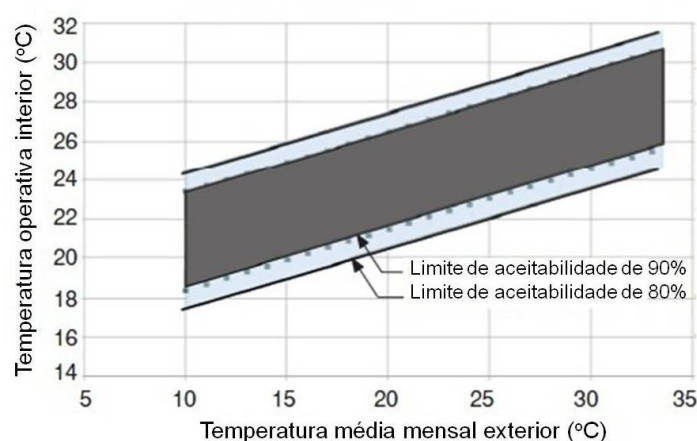


Figura 2.7 – Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média mensal exterior (adaptado de ASHRAE 55, 2010)

A relação linear da Figura 2.7 representa o intervalo de conforto da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , em função da temperatura média mensal exterior, T_m , para duas classes de conforto correspondentes a 80 % e 90 % de satisfação dos ocupantes. O modelo adaptativo é válido para as seguintes condições:

- A temperatura média mensal exterior, T_m , é variável entre 10 °C e 33.5 °C;
- Os edifícios têm ventilação natural sendo o ambiente térmico dos compartimentos regulado pelos seus ocupantes, pela abertura e fecho dos vãos envidraçados, de fácil acesso;
- Os edifícios podem dispor de sistema de aquecimento. O modelo de conforto adaptativo não é contudo válido quando o sistema estiver em funcionamento;
- Os edifícios não podem ter qualquer sistema mecânico de refrigeração. Podem, no entanto, ter instalados sistemas mecânicos de ventilação, como um ventilador;
- Os ocupantes devem ter nível de atividade entre 1,0 e 1,3 met e ser livres para adaptar o seu vestuário às condições ambientais interiores e exteriores.

A expressão adotada no cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , em função da temperatura média mensal exterior, T_m , encontra-se traduzida pela Equação 2.2. Trata-se da equação de regressão que rege o modelo, proposta por Brager & de Dear (1998):

$$T_{oc} = 17,8 + 0,31.T_m \quad (2.2)$$

em que

T_{oc} : Temperatura operativa de conforto - [°C]

T_m : Temperatura média mensal exterior - [°C]

Não é especificado na norma se a temperatura media mensal exterior se refere a média do mês do calendário civil, aos últimos 30 dias ou a dados constantes nas normais climatológicas. (Nicol, *et al.*, 2010; Turner, 2008).

A zona de conforto correspondente a 80% de aceitabilidade, tem uma largura de banda de ± 3.5 °C em torno em torno da temperatura operativa de conforto, T_{oc} . Aplica-se a edifícios existentes e reabilitados. A zona de conforto correspondente a 90% de aceitabilidade tem uma largura de banda de ± 2.5 °C em torno da temperatura operativa de conforto, T_{oc} . Aplica-se a edifícios novos onde se exigem níveis elevados de conforto.

A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) admite, de forma simplificada, a utilização da temperatura do ar interior, T_i , como aproximação da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , com base no cumprimento das seguintes condições:

- Inexistência de painéis radiantes de aquecimento ou de arrefecimento;
- O fator solar dos envidraçados é inferior a 0,48;
- Inexistência de uma fonte de calor no compartimento;
- O coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados e das paredes exteriores obedece à seguinte relação (Equação 2.3):

$$U_m < \frac{50}{t_{d,i} - t_{d,e}} \quad (2.3)$$

em que

U_m : Valor médio entre o coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado e da parede exterior - $[W/m^2\text{°C}]$

$t_{d,i}$: Temperatura interior de dimensionamento - $[^\circ\text{C}]$

$t_{d,e}$: Temperatura exterior de dimensionamento - $[^\circ\text{C}]$

Utilizou-se na Tese o modelo adaptativo da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) para avaliação do conforto térmico de verão e de inverno, do Apartamento-Tipo instrumentado (Capítulo 3), tendo para o efeito sido considerada uma classe de conforto correspondente a 80% de satisfação dos ocupantes.

2.2.4.3. MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO – EN 15251

A norma EN 15251: *Criteria for the indoor environment including thermal, indoor air quality, lighting and noise* (CEN, 2007) define requisitos para avaliação da qualidade do ambiente interior em edifícios, de um ponto de vista térmico, da qualidade do ar, da iluminação e do ruído, sendo a sua aplicação determinante na avaliação do desempenho térmico de edifícios novos e existentes. A norma EN 15251 inclui um método adaptativo para avaliação do conforto térmico válido nas seguintes condições:

- Os edifícios não podem ter qualquer sistema mecânico de refrigeração. A ventilação mecânica com ar não condicionado pode ser usada no verão, desde que os caudais e os consumos sejam baixos, tais como: ventoinhas, persianas, ventilação noturna e outros meios passivos de arrefecimento;
- A abertura e o fecho das janelas é o meio de regulação da temperatura prioritário;
- Os edifícios podem ter um sistema de aquecimento, desde que este não inclua meios de ventilação mecânica de ar tratado;
- Os ocupantes devem estar em atividades físicas sedentárias com taxas metabólicas que variam entre 1.0 a 1.3 met;
- Não podem existir “políticas” de vestuário no edifício, a fim de permitir que os ocupantes ajustem o vestuário ao seu metabolismo e se adaptem livremente ao ambiente interior.

No seu anteprojeto (CEN, 2005) o modelo adaptativo proposto foi o preconizado pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010), descrito no Capítulo 2.2.4.2. O cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , é baseado na equação de regressão proposta por Brager & de Dear (2001), sendo

estabelecido em função da temperatura média mensal exterior, T_m . No anteprojeto de 2005 da norma, o modelo adaptativo era válido apenas para espaços com ocupação até quatro pessoas, como a habitação e pequenos escritórios (Boerstra, 2006; Nicol, *et al.*, 2007).

Na sua versão final, a norma EN 15251 (CEN, 2007) preconiza um modelo adaptativo inspirado nos resultados obtidos do projeto *Smart Controls and Thermal Comfort* (SCATs) (Mc Cartney, *et al.*, 2002; Nicol, *et al.*, 2000). O modelo adaptativo da norma EN 15251 (CEN, 2007) é válido para espaços sem limitação do número de ocupantes.

A expressão adotada no cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , da norma EN 15251, é estabelecida em função da temperatura média exterior ponderada, T_{mp} . A expressão que rege o modelo adaptativo da EN 15251 é traduzida pela Equação 2.4:

$$T_{oc} = 0,33.T_{mp} + 18,8 \quad (2.4)$$

em que

T_{oc} : Temperatura operativa de conforto - [°C]

T_{mp} : Temperatura média exterior ponderada - [°C]

O cálculo da temperatura média exterior ponderada, T_{mp} , é estabelecido com base nos valores das temperaturas médias diárias da semana precedente, aplicando expressão da Equação 2.5 (CIBSE, 2006; EN 15251, 2007). A utilização do valor temperatura média exterior ponderada, T_{mp} , parte do princípio que o intervalo de tempo característico, em que um indivíduo demora a ajustar-se totalmente às alterações climáticas exteriores é de, aproximadamente, uma semana:

$$T_{mp} = \frac{(T_{n-1} + 0.8.T_{n-2} + 0.6.T_{n-3} + 0.5.T_{n-4} + 0.4.T_{n-5} + 0.3.T_{n-6} + 0.2.T_{n-7})}{3.8} \quad (2.5)$$

em que

T_{mp} : Temperatura média exterior ponderada - [°C]

T_{n-i} : Temperatura média exterior do dia (i) anterior - [°C]

Na norma europeia EN 15251 os ambientes térmicos são classificados por categorias, em função do grau de exigência pretendido para o edifício em análise e na sensação de conforto dos seus ocupantes, de acordo com o especificado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Descrição das categorias de conforto especificadas (adaptado de EN 15251, 2007)

Categoria	Descrição
I	Elevado nível de expectativa. Categoria recomendada para espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e frágeis com necessidades especiais, como deficientes, doentes, crianças muito pequenas e idosos.
II	Nível normal de expectativa. Categoria recomendada para novas construções e renovações.
III	Nível moderado de expectativa. Categoria recomendada para edifícios existentes
IV	Valores fora dos critérios acima estabelecidos. Categoria aceite apenas para períodos limitados.

O gráfico da Figura 2.8 representa as categorias de conforto especificadas na EN 15251, obtidas em função da temperatura operativa de conforto, T_{oc} . As categorias de conforto representadas na Figura

2.8, são obtidas considerando uma largura de banda em torno de uma linha central definida pela Equação 2.4. Os valores especificados no Quadro 2.4 representam a largura de banda a acrescentar à Equação 2.4, para cada categoria especificada.

Quadro 2.4 - Largura de banda por categoria de conforto (adaptado de EN 15251, 2007)

Categoria	Largura de Banda – T_{oc} [°C]
I	± 2
II	± 3
III	± 4

Os limites das categorias de conforto representados na Figura 2.8 aplicam-se quando $10\text{ °C} < T_{mp} < 30\text{ °C}$, para o limite superior e $15\text{ °C} < T_{mp} < 30\text{ °C}$, para o limite inferior.

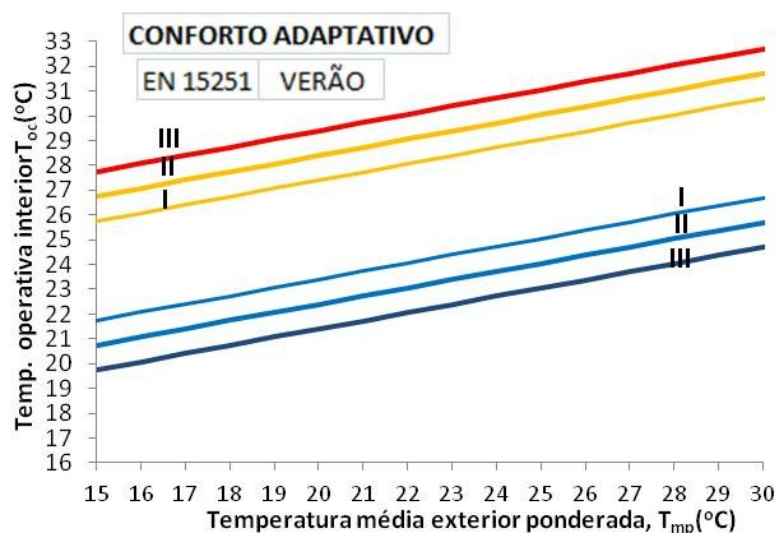


Figura 2.8 – Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada (verão) (adaptado de EN 15251, 2007)

Quando o valor de T_{mp} é inferior a 10 °C , a norma EN 15251 preconiza a utilização, para as 3 categorias, dos limites superiores de conforto para edifícios com sistema mecânico de arrefecimento da Tabela A.2, do anexo A da norma (EN 15251, 2007). No cálculo dos limites inferiores de conforto, quando o valor de T_{mp} é inferior a 15 °C , utilizam-se os limites inferiores da referida tabela. Nestas circunstâncias, os limites máximos e mínimos aceitáveis são constantes, sendo definidos como para os edifícios climatizados (Boerstra, 2006; EN 15251, 2007). A adoção de valores independentes das condições exteriores (Figura 2.9), para essa gama de temperaturas, baseia-se no pressuposto que, durante o inverno, quer o edifício tenha ou não sistemas mecânicos de arrefecimento, terá sempre um sistema ativo de aquecimento (Boerstra, 2006).

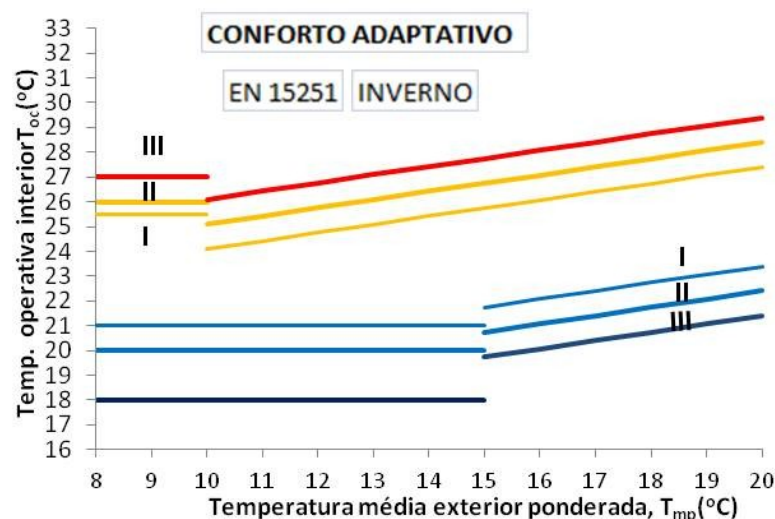


Figura 2.9 – Valores recomendados da temperatura operativa de conforto em função da temperatura média exterior ponderada (inverno) (adaptado de EN 15251, 2007)

Na Tese foi amplamente utilizado o modelo adaptativo da norma EN 15251 (CEN, 2007), tanto no estudo do conforto térmico de verão como de inverno. O âmbito da Tese são os edifícios de habitação social, pelo que se considerou uma categoria de conforto III, correspondente a um nível de expectativa moderado.

2.2.4.4. MODELO DE CONFORTO ADAPTATIVO – LNEC

Dispomos de um modelo adaptativo desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para definição das condições de conforto térmico em Portugal. Neste modelo, o índice de conforto térmico determinado, engloba a influência de parâmetros objetivos (ambientais) e subjetivos (percepção térmica) obtidos com base em estudos de campo e complementados por tratamento de carácter sociológico. O estudo foi desenvolvido por Matias (2010), tendo sido suportado pela medição *in situ* dos parâmetros de conforto térmico, e pela realização de inquéritos aos ocupantes para posterior validação dos resultados experimentais.

O estudo de Matias (2010) definiu duas temperaturas de conforto, T_{conf} , obtidas em função da temperatura média exterior ponderada, T_{mp} , calculada com base na Equação 2.5. As duas temperaturas de conforto dizem respeito a duas situações distintas: edifícios com sistemas de climatização ativados e edifícios não climatizados, por não possuírem qualquer tipo de sistema de climatização instalado, ou por os sistemas existentes se encontrarem desativados (Figura 2.10).

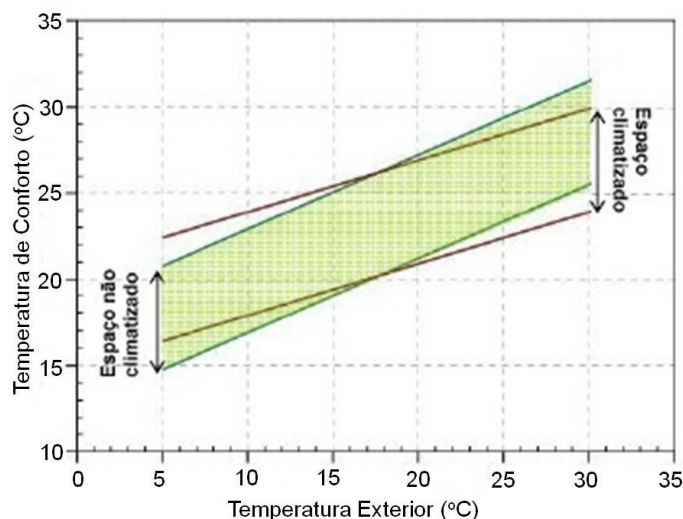


Figura 2.10 – Valores recomendados da temperatura de conforto em função da temperatura média exterior ponderada (adaptado de Matias, 2010)

O estudo de Matias (2010) inclui uma zona de conforto para uma aceitabilidade de 90%, definida com uma largura de banda de ± 3 °C em torno da temperatura de conforto (Figura 2.10). O gráfico indica, para edifícios não climatizados, temperaturas limites no inverno e no verão de, respetivamente, 15.0 °C e 31.0 °C. É evidente uma maior tolerância dos ocupantes aos limites extremos de conforto térmico, nos edifícios não climatizados, comparativamente com os edifícios climatizados.

O autor salienta que as temperaturas-limite indicadas só devem ser consideradas em ambientes interiores com elevada possibilidade de adaptação, quer pessoal quer ambiental, apenas disponível em edifícios residenciais.

Os estudos de campo desenvolvidos por Matias (2010) em edifícios de serviços e residenciais, para avaliação das condições de conforto, envolveram a medição de vários parâmetros ambientais (interiores e exteriores), incluindo a temperatura do ar interior, T_i , e a temperatura média radiante, T_{mr} . Com ambas as temperaturas foi possível estabelecer o cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} .

No gráfico da Figura 2.11 apresenta-se a relação obtida entre os valores médios da temperatura do ar interior, T_i , e da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , para a totalidade dos estudos de campo desenvolvidos (Matias, 2010). Os resultados obtidos revelam uma relação de dependência linear entre os dois parâmetros correlacionados (coeficiente de correlação linear de Pearson, $R=0.99$), confirmando que, para casos correntes, a temperatura do ar interior, T_i , pode ser utilizada como uma boa aproximação da temperatura operativa de conforto, T_{oc} (Almeida, 2011).

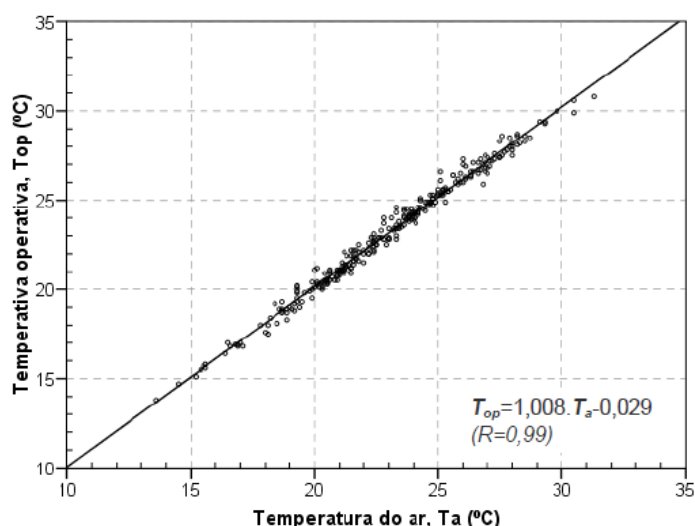


Figura 2.11 – Relação entre os valores médios das temperaturas operativa e do ar (adaptado de Matias, 2010)

Optou-se por não utilizar na Tese o modelo adaptativo desenvolvido pelo LNEC. Os estudos de campo desenvolvidos por Matias (2010), para avaliação das condições de conforto, incidiram sobretudo em edifícios de serviços (escritórios e escolas) e lares de idosos. No setor residencial foram apenas estudados 4 edifícios multifamiliares de habitação. Dado que a amostra estudada não incide maioritariamente nos edifícios de habitação, optou-se pela não utilização deste modelo.

2.2.4.5. CORREÇÃO DA TEMPERATURA ADAPTATIVA DE CONFORTO

Os modelos de conforto térmico adaptativo descritos nos Capítulos 2.2.4.2, 2.2.4.3 e 2.2.4.4 permitem considerar o efeito da velocidade do ar na redução do valor máximo da temperatura operativa de conforto. O aumento da velocidade do ar, com recurso a ventilação natural ou a ventoinhas, permite atenuar a sensação de calor provocada por temperaturas elevadas no verão, devido ao incremento das trocas de calor por convecção entre o corpo humano e o meio ambiente. Esse aumento permite estabelecer uma correção dos limites superiores das temperaturas operativas de conforto representados nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.10. O valor do termo de correção é obtido no gráfico da Figura 2.12.

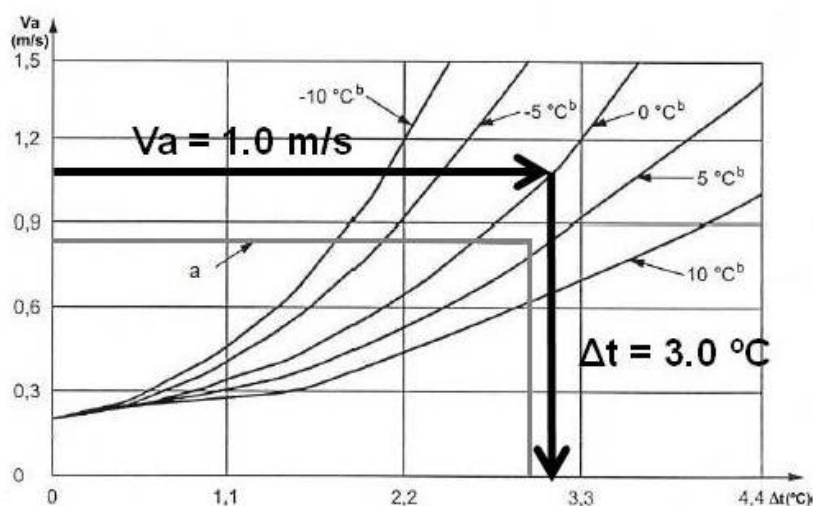


Figura 2.12 – Atenuação do valor da temperatura operativa de conforto por aumento da velocidade do ar (adaptado de ISO 7730, 2005)

As curvas representadas no gráfico da Figura 2.12 correspondem a uma temperatura de referência de 26°C e uma velocidade média do ar de 0.2 m/s (ASHRAE 55, 2010; ISO 7730, 2007). Os parâmetros que constam da figura são os seguintes:

ΔT : Incremento de temperatura acima de 26 °C - [°C]

V_{ar} : Velocidade média do ar - [m/s]

a : Limites para uma atividade ligeira (1,2 met): $\Delta T < 3$ °C e $V_{ar} < 0,82$ m/s;

b : Diferença entre a temperatura radiante, T_r , e a temperatura do ar interior, T_i - [°C]

De acordo com o representado na Figura 2.12, a utilização de uma ventoinha de teto a funcionar de modo a garantir uma velocidade do ar de 1 m/s permite considerar uma temperatura operativa de conforto superior em 3.0 °C (Nicol, *et al.*, 2009).

Muito embora os modelos de conforto térmico adaptativo prevejam a possibilidade de aumento do valor máximo da temperatura operativa de conforto, no verão, devido ao efeito benéfico da velocidade do ar, não foi considerada, na Tese, a correção do referido limite de conforto.

2.2.5. UTILIZAÇÃO DO CO₂ COMO INDICADOR DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

O dióxido de carbono (CO₂) é expelido através da respiração, sendo também gerado em processos de combustão em aparelhos de queima (fogões a gás, esquentadores). É um gás incolor, inodoro, insípido e não inflamável, podendo atuar como irritante do sistema respiratório. A sua concentração no ar interior pode dar uma boa indicação da taxa de ventilação (APA, 2009).

O número de pessoas, o tamanho do espaço e o nível da atividade física influenciam a concentração deste agente em ambientes fechados. Deste modo, se os outros poluentes são gerados a uma taxa que também dependa do nível de ocupação, o CO₂ é um bom indicador da concentração desses poluentes (Viegas, 2000). Neste contexto, a concentração de CO₂ no ar interior é utilizada na legislação internacional como parâmetro de avaliação da Qualidade do Ar Interior (QAI).

Em espaços com ocupação sedentária, nos quais a fonte poluente é exclusivamente o metabolismo humano, foi constatada uma correlação entre a concentração de CO₂ do espaço e o seu índice de aceitabilidade em termos de odor dos biofluentes humanos (Viegas, 2000; Pinto, 2000). A concentração de CO₂ não deve exceder 660 ppm acima da concentração do ar exterior, para que 80% das pessoas recém-chegadas ao espaço considerem aceitável o nível dos odores corporais humanos. O valor sobe para 1190 ppm para uma aceitabilidade de 70 % (Viegas, 2000). A concentração de CO₂ no exterior, numa região não poluída, ronda os 370 ppm (IPCC, 2001).

A Equação 2.6 (Olesen, 2004; Pinto, 2006) traduz a relação entre a QAI de um espaço e a percentagem previsível de ocupantes recém-chegados insatisfeitos, tendo por base a concentração de CO₂ como indicador dos biofluentes:

$$PD = 395 \cdot \exp(-15.15 \cdot C_{CO_2}^{-0.25}) \quad (2.6)$$

em que

PD : Percentagem de pessoas insatisfeitas - [%]

C_{CO_2} : Concentração de CO₂ acima da concentração exterior - [ppm]

A Equação 2.6, representada na Figura 2.13, é válida para espaços com ocupação sedentária, nos quais a fonte de poluição é o metabolismo humano.

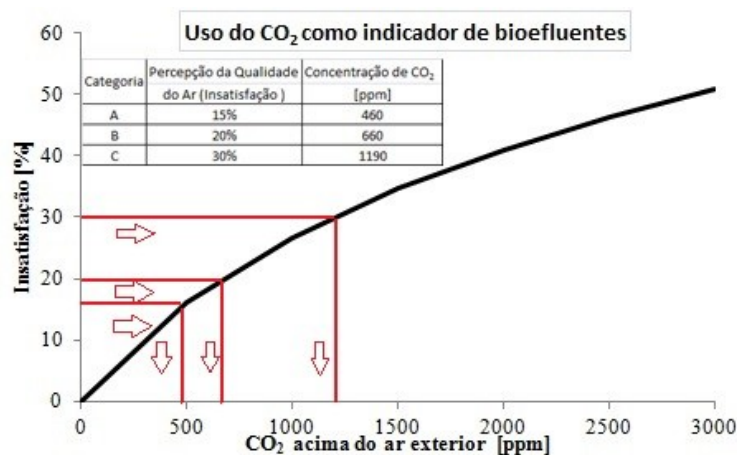


Figura 2.13 – Concentração de CO₂ como indicador da qualidade do ar (adaptado de Pinto, 2006)

Na legislação portuguesa o valor de referência definido pelo RSECE (RSECE, 2006) para a concentração máxima de CO₂ em edifícios existentes é de 1800 mg/m³, valor correspondente a aproximadamente 1000 ppm. Há uma clara associação entre concentrações de CO₂ acima de 1000 ppm e a percepção do respetivo ambiente como desconfortável (Persily, 1996).

A norma ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2004), no que diz respeito aos odores dos bioefluentes humanos, recomenda um valor limite de concentração de CO₂ de 700 ppm acima do valor registado no exterior. Para uma concentração exterior de 370 ppm (IPCC, 2001), o valor recomendado equivale a uma concentração interior de 1070 ppm. O valor máximo para residências indicado pela norma é de 3500 ppm.

Uma vez que o CO₂ não é considerado um gás tóxico, a Organização Mundial de Saúde (OMS) não indica um valor limite máximo para a sua concentração no interior de edifícios residenciais.

2.2.6. SÍNTESE

A Tese desenvolvida pretendeu estudar o conforto térmico de um conjunto de habitação social reabilitado. O estrato socioeconómico dos residentes, sem hábitos de aquecimento e de arrefecimento do ar ambiente, pressupõe a adoção de uma metodologia adaptativa na abordagem ao estudo do conforto térmico.

Os apartamentos encontram-se em regime de variação livre de temperatura, para o qual o conforto térmico interior experimentado pelos ocupantes está fortemente condicionado pelo facto de maioritariamente estes não aquecerem as habitações, fruto da sua condição socioeconómica.

Nos Capítulos 2.2.4.2, 2.2.4.3 e 2.2.4.4 apresentou-se os modelos de conforto térmico adaptativo que constam das normas ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010), EN 15251 (CEN, 2007), e o modelo disponibilizado pelo LNEC (Matias, 2010). Destes 3 modelos foram utilizados os 2 que constam da normalização: o modelo adaptativo da ASHRAE 55 e o modelo adaptativo da EN 15251.

Muito embora a aplicação dos modelos de conforto térmico adaptativo pressuponha a determinação da temperatura operativa de conforto, T_{op} , foi para o efeito adotada uma simplificação devidamente justificada nos Capítulos 2.2.4.2 e 2.2.4.4: a temperatura do ar interior, T_i , foi utilizada como uma boa aproximação da temperatura operativa de conforto, T_{op} .

Na aplicação dos modelos adaptativos das normas ASHRAE 55 e EN 15251 foram consideradas classes de conforto térmico compatíveis com as características socioeconómicas dos residentes no

conjunto da habitação social estudado. Na aplicação do modelo da ASHRAE 55 foi considerada a classe de conforto correspondente a 80 % de satisfação dos ocupantes e no modelo da EN 15251, a categoria III, correspondente a um nível moderado de expectativa.

Foi estudada a concentração de CO₂ no ar interior tendo o seu valor sido comparado com os critérios de aceitabilidade constantes do Capítulo 2.2.5, designadamente o estipulado na regulamentação nacional e o traduzido pela Equação 2.5 (Olesen, 2004; Pinto, 2006). A OMS não indica, no entanto, um valor-limite máximo para a sua concentração no interior de edifícios residenciais.

2.3. CONSUMOS ENERGÉTICOS

2.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A reabilitação dos edifícios de habitação social deve, a par de melhoria das condições de conforto térmico dos apartamentos, promover uma melhoria significativa da sua eficiência energética.

O setor dos edifícios representa uma parcela significativa do balanço energético nacional. Conforme representado na Figura 2.14 (DGEG, 2011), o peso do setor dos edifícios no consumo de energia final, foi de 27,9 % (16,6 % no Doméstico, 11,3 % nos Serviços).

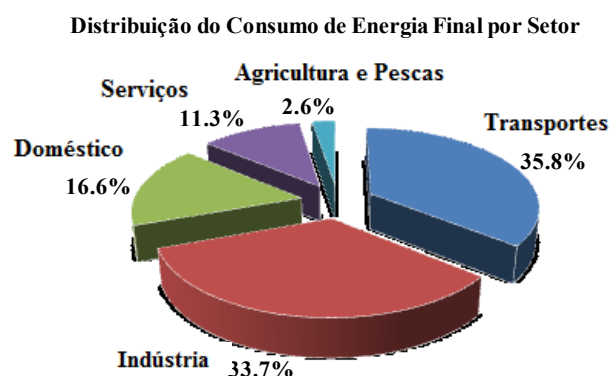


Figura 2.14 – Consumo de energia final por setor (adaptado de DGEG, 2011)

Os consumos de energia têm vindo a crescer desde 2000, no entanto, tanto o consumo total de energia, como o consumo de energia elétrica, têm decrescido desde 2009. A Figura 2.15 apresenta a variação do consumo total de energia e consumo de energia elétrica, em Portugal, desde 1990 a 2008, no setor doméstico. O decréscimo dos consumos nos últimos anos não está dissociado da crise socioeconómica que o país atravessa. Esta diminuição é sobretudo manifesta na parcela afeta ao aquecimento e arrefecimento ambiente.

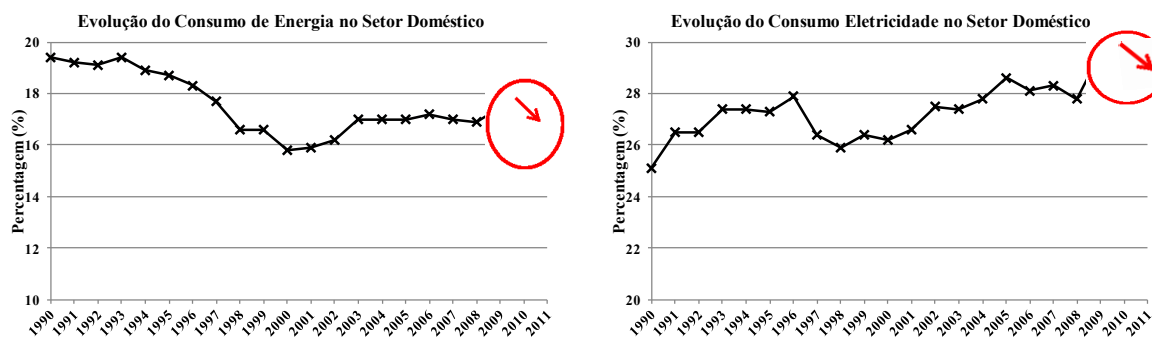


Figura 2.15 – Evolução do consumo de energia final e de eletricidade no setor doméstico de 1990 a 2011 (adaptado de Pordata, 2013)

A Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios reafirma a necessidade de conter o consumo energético nos edifícios residenciais e de serviços, que num contexto europeu consomem mais de 40 % do valor da energia final, com tendência de aumento dos consumos e das respetivas emissões de CO₂ (União Europeia, 2010). Esta realidade está claramente em contraciclo com a realidade nacional, uma vez que o aumento do consumo no setor dos edifícios, aplica-se aos edifícios do norte e centro da Europa, países com realidades climáticas e socioeconómicas atuais, bastante diferentes da realidade portuguesa.

Num contexto de contenção dos consumos no setor dos edifícios em Portugal nos últimos 4 anos, com particular ênfase para o setor doméstico, torna-se particularmente relevante definir estratégias de reabilitação que conduzam à obtenção de um conjunto de soluções que potenciem as condições de conforto térmico e de eficiência energética dos edifícios de habitação, sem incremento dos consumos. Essa preocupação é por maioria de razão mais pertinente nos edifícios de habitação social, onde o estrato socioeconómico da população residente é mais baixo.

2.3.2. CONSUMOS ESPECÍFICOS DO SETOR DOMÉSTICO

Em termos de utilização final, tendo como base de análise os dados fornecidos nos resultados preliminares do Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico realizado em 2010 (INE, 2011), o consumo de energia nos edifícios residenciais distribui-se aproximadamente da seguinte forma, conforme representado na Figura 2.16: cozinhas (36.9 %), aquecimento de águas (31.3 %), iluminação e equipamentos elétricos com destaque para os pequenos eletrodomésticos, equipamentos de entretenimento e informática (23 %), aquecimento e arrefecimento ambiente (8.8 %).

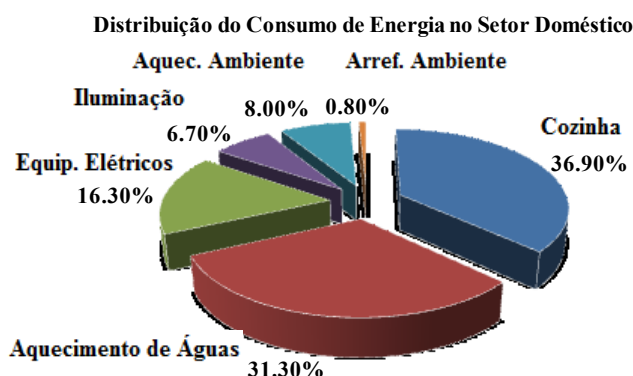


Figura 2.16 – Distribuição do consumo de energia no alojamento, por tipo de uso, em 2010 (adaptado de INE, 2011)

Dentre as fontes energéticas utilizadas no setor doméstico (INE, 2011), a eletricidade assume um papel preponderante (44.1 %), seguida da lenha (24.2 %) e do GPL garrafa (17.1 %). O consumo de energia elétrica destaca-se dado que a maioria dos equipamentos presentes nos alojamentos requer este tipo de fonte de energia:

- As cozinhas e os equipamentos elétricos são responsáveis por, respetivamente, 40% e 33% do consumo total de eletricidade no setor doméstico (INE, 2011);
- A iluminação elétrica representa 6.7 % do consumo total de eletricidade no setor doméstico (INE, 2011);

- A produção de águas quentes sanitárias, cuja fonte energética se divide entre o GPL garrafa, o gás natural e a eletricidade (INE, 2011), tem no incremento da energia solar térmica uma solução de base para efeitos de redução dos consumos energéticos;
- O consumo de energia para o aquecimento e arrefecimento ambiente corresponde, respetivamente, a 8 % e 0.8 %, do consumo total de energia no setor doméstico, em 2010. A eletricidade foi a principal fonte de energia utilizada, verificando-se contudo que o gásóleo de aquecimento representa já uma fatia importante do consumo de energia nesse tipo de utilização (INE, 2011).

J.P. Coimbra (2013), no âmbito da sua tese de doutoramento, monitorizou os consumos mensais de gás natural e de eletricidade de 4 empreendimentos de habitação cooperativa, num total de 129 fogos monitorizados. O estudo realizado concluiu que o consumo médio anual de energia destinada ao aquecimento ambiente é de 5.5 kWh/m².

A análise dos resultados permite extrair as seguintes conclusões:

- Portugal é um país de "clima ameno" onde o conforto térmico pode obter-se privilegiando os meios passivos, ao contrário do que se passa noutros países europeus, onde os sistemas mecânicos de aquecimento e de arrefecimento ambiente assumem elevado relevo no consumo de energia no setor doméstico;
- O consumo de energia destinada ao conforto térmico (aquecimento e arrefecimento ambiente), em Portugal, representa menos de 10 % do total dos consumos no setor doméstico;
- Não estão disponíveis estudos estatísticos relativos ao consumo energético nos edifícios de habitação social em Portugal. De qualquer modo é previsível, em face de um menor rendimento disponível das famílias, que os consumos destinados ao aquecimento e arrefecimento ambiente, sejam substancialmente inferiores aos indicados (INE, 2011), ou quase nulos (Matias, *et al.*, 2012). No estudo desenvolvido por J. Coimbra (2013) monitorizou-se um consumo anual destinado ao aquecimento ambiente, no setor cooperativo, de 5.5 kWh/m². Crê-se que nos edifícios de habitação social, o consumo possa ser substancialmente inferior;
- Num cenário de ausência quase absoluta de consumos de energia destinada ao aquecimento e ao arrefecimento ambiente assume particular relevo a reabilitação numa ótica de conforto térmico "passivo" (Pina dos Santos, 2012).

2.3.3. SÍNTESE

A reabilitação dos edifícios residenciais, com particular ênfase, no âmbito da Tese, para os edifícios de habitação social, é um imperativo na sociedade de hoje.

Nos edifícios residenciais, o consumo de energia destinada ao conforto térmico (aquecimento e arrefecimento ambiente) representa, em Portugal, menos de 10 % do total dos consumos no setor doméstico.

Nos edifícios de habitação social os consumos de energia destinados ao aquecimento e arrefecimento ambiente são escassos, quase nulos. É num contexto de muito baixos consumos energéticos destinados ao conforto térmico (aquecimento e arrefecimento ambiente) que importa otimizar soluções de reabilitação que recorram a estratégias passivas.

2.4. VENTILAÇÃO NOTURNA

2.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A ventilação por exigências de conforto térmico de verão tem por objetivo promover a dissipação das cargas térmicas, melhorando o conforto térmico. Na estação de arrefecimento, a ação do vento garante a renovação de ar nos edifícios e evita o sobreaquecimento.

A ventilação noturna promove um aumento do conforto térmico de verão, devido à diminuição do pico das temperaturas diárias na estação de arrefecimento e ao desfasamento temporal entre a temperatura do ar exterior e interior. Para tal, é necessário que a concentração de poluentes do ar exterior seja inferior à sua concentração no ar interior e que a temperatura do ar exterior se encontre abaixo do limite superior de conforto.

De acordo com M. Santamouris (2005), a ventilação pode contribuir para melhorar as condições térmicas interiores para 3 mil milhões de pessoas de classe social média e baixa, em edifícios deficientemente projetados, com cenários de sobreaquecimento no verão. A integração de sistemas de ventilação natural diminui as necessidades de arrefecimento atenuando os problemas de sobreaquecimento dos edifícios. A ventilação diurna, em climas amenos, e a ventilação noturna, em climas quentes, têm provado a eficácia destas técnicas.

2.4.2. PRINCIPAIS ESTUDOS NO ÂMBITO DA VENTILAÇÃO NOTURNA

Destacam-se os seguintes estudos no domínio da ventilação noturna em regime térmico de verão:

- Givoni (2009) monitorizou 1 edifício no Sul da Califórnia, com ventilação noturna, onde verificou que para a temperatura do ar exterior de 38 °C, a temperatura do ar interior não ultrapassou 24,5 °C;
- Artman, *et al.* (2006) avaliaram o potencial da ventilação nos climas europeus. Provou-se no estudo a eficácia da ventilação noturna, no verão, nos países do norte da Europa e Ilhas Britânicas. A eficiência diminui na Europa Central, de Leste, em Portugal, Espanha, Grécia e Turquia, mantendo, no entanto, um nível aceitável. Aponta-se como exemplo, a cidade Lisboa, onde se registam duzentas noites por ano em que o potencial de arrefecimento é considerado eficaz, prevendo-se que em apenas 15 noites do ano, o potencial de arrefecimento por ventilação noturna, não é eficaz. O mesmo estudo aponta o Norte de Portugal, como uma região com um potencial de ventilação noturna, ao nível do Centro da Europa;
- Santamouris, *et al.* (2010) monitorizaram 214 edifícios de habitação, na Grécia, para avaliação do impacto da ventilação noturna, nas necessidades energéticas de arrefecimento. Os resultados obtidos salientam que o impacto da ventilação noturna varia em função a taxa de renovação de ar adotada e das características construtivas dos edifícios monitorizados. De um ponto de vista quantitativo, a introdução de ventilação noturna resultou numa redução máxima das necessidades anuais de arrefecimento de 40 kWh/m², sendo o valor médio da redução anual igual a 12 kWh/m²;
- Shaviv, *et al.* (2001) estudaram a influência da inércia térmica e da ventilação noturna na temperatura máxima do ar interior, no verão, de 1 edifício de habitação, em 4 cidades de Israel. Foram consideradas no estudo 4 classes de inércia (leve, média, semipesada e pesada) e 4 níveis de ventilação noturna (sem ventilação noturna, ventilação natural com taxa de renovação horária de 5 h⁻¹ e ventilação forçada com taxas de 20 h⁻¹ e 30 h⁻¹). Os resultados do estudo salientam que quanto maior for a amplitude térmica diária do local, maior é a redução da temperatura do ar

interior, da mesma forma que quanto maior é a inércia térmica do edifício, maior é a redução da temperatura do ar interior. O estudo conclui que num edifício com inércia térmica otimizada e com taxa de renovação de ar apropriada para a ventilação noturna é possível uma redução entre 3 °C e 6 °C, no valor da temperatura do ar interior.

Os 4 estudos citados destacam a importância da ventilação noturna no conforto térmico de verão, pelo seu potencial de controlo dos picos de sobreaquecimento e de redução da temperatura do ar interior para valores abaixo do limite do conforto.

2.4.3. SÍNTESE

Na Tese estudou-se a influência da ventilação noturna no conforto térmico e na eficiência energética, com adoção de uma taxa de renovação de ar, no período noturno, entre as 0 e as 8 horas, de 5 h⁻¹. Foi avaliada a influência do valor da taxa de renovação no desempenho térmico de verão, com a adoção de valores variáveis entre 2 h⁻¹ e 6 h⁻¹.

2.5. PRINCIPAIS ESTUDOS NO ÂMBITO DA TESE

2.5.1. ESTUDOS NACIONAIS

Não existem muitos estudos realizados em Portugal com o intuito de avaliar o conforto térmico e a eficiência energética, em edifícios de habitação social reabilitados. Destacam-se, no entanto, fora do âmbito da habitação social, estudos relevantes para a Tese, efetuados no setor dos edifícios residenciais. Salientam-se os seguintes:

- Matias (2010) no âmbito da sua Tese de Doutoramento avaliou as condições de conforto térmico de edifícios, em Portugal, com base em estudos de campo com realização de medições experimentais e inquéritos. A Tese visou o desenvolvimento de um modelo adaptativo de caracterização e de definição das condições de conforto térmico. Como principais conclusões do estudo destaca-se:
 - Segundo o autor, há a possibilidade de se obter a satisfação dos requisitos de conforto térmico no setor residencial, em edifícios sem sistemas de aquecimento e de arrefecimento ambiente, com temperaturas do ar interior que variam entre 15°C e 31°C. O estudo peca, no entanto, por ter analisado apenas 4 edifícios residenciais, focando-se sobretudo nos edifícios de serviços e nos lares de idosos;
 - O autor refere que o modelo adaptativo por ele desenvolvido define gamas de temperatura de conforto que permitem dispensar, em Portugal, na grande maioria dos espaços interiores, o recurso a sistemas de aquecimento e de arrefecimento ambiente, sendo para isso fundamental assegurar a possibilidade de adaptação;
 - O autor destaca que as temperaturas de referência de conforto térmico indicadas na regulamentação não são representativas dos limites de conforto térmico. Neste contexto, sugere a adoção de um modelo adaptativo.
- Rodrigues, Vicente e Cardoso (2011) estudaram o desempenho térmico de um conjunto de apartamentos de habitação social construído na década de 80, em Aveiro, numa fase anterior à existência de regulamentação térmica dos edifícios. Os autores criticam fortemente a possibilidade de se poder melhorar a classe de eficiência energética do apartamento, à luz da regulamentação, bastando para o efeito adotar um sistema solar térmico, sem no entanto ter de

garantir o cumprimento dos requisitos mínimos de qualidade térmica da sua envolvente. No final do estudo os autores concluem que a adoção de soluções passivas que privilegiem o conforto térmico, na reabilitação de edifícios de habitação social, não pode ser esquecida em favor da instalação de novos equipamentos;

- Araújo, Almeida e Bragança (2013) efetuaram uma análise paramétrica ao desempenho térmico de um edifício localizado em Ponte de Lima, com inércia térmica forte. O estudo paramétrico desenvolvido permitiu concluir que a regulamentação térmica desvaloriza os parâmetros caracterizadores do conforto térmico (coeficiente de transmissão térmica da envolvente, U , e fator solar dos envidraçados, g_{\perp}), em favor da eficiência dos sistemas mecânicos instalados. Os autores sustentam que a regulamentação subvaloriza o conforto térmico e as soluções passivas, questões essenciais no estudo do desempenho térmico dos edifícios residenciais;

- Coimbra e Almeida (2013) estudaram 2 edifícios multifamiliares de habitação cooperativa no concelho de Matosinhos, construídos em décadas distintas, representativos da construção cooperativa tradicional e sustentável, respetivamente. Monitorizou-se durante 1 ano um total de 65 apartamentos, tendo-se constatado que o acréscimo de custo da solução sustentável, com melhoria do isolamento térmico da envolvente, das janelas e dos sistemas de ventilação é de 4.2 % relativamente à solução tradicional, permitindo um retorno do investimento que varia entre 2.3 e 24 anos, consoante o nível de conforto preconizado. Os autores concluem que o reduzido acréscimo de custo da construção cooperativa sustentável constitui uma referência para a reabilitação da habitação social.

Os estudos nacionais citados destacam a importância da adoção de soluções passivas no incremento do conforto térmico dos edifícios residenciais, que passam, entre outras, pelo estudo da composição das fachadas e coberturas, pela caracterização de vãos, caixilharias e envidraçados, pela seleção adequada dos sistemas e soluções construtivas, de modo a permitir uma redução das necessidades de aquecimento, de arrefecimento e de ventilação mecânica. Do estudo de Matias (2010) salienta-se a necessidade de aplicação de modelos adaptativos na avaliação do conforto térmico deste tipo de edifícios.

2.5.2. ESTUDOS INTERNACIONAIS

Fora de Portugal salientam-se os seguintes estudos relevantes:

- Suárez, *et al.* (2011) estudaram o conforto térmico e a eficiência energética de um conjunto de habitação social reabilitado, composto por 68 apartamentos, localizado em Córdoba, no sul de Espanha, num clima mediterrânico com elevados ganhos térmicos de radiação no verão. Foram adotadas soluções de reforço do isolamento térmico da envolvente exterior do tipo ETICS, de proteção solar dos envidraçados e de ventilação noturna no verão. As necessidades energéticas de aquecimento foram reduzidas em 45 % e de arrefecimento em 30 %. Os autores referem que a temperatura do ar interior no inverno encontra-se dentro dos limites de conforto térmico, contudo no verão excede os limites de conforto entre 2 a 3 °C, atingindo valores que variam de 28 a 33 °C;

- Hong S. (2011) no âmbito da sua Tese de Doutoramento avaliou o consumo energético de aquecimento e estabeleceu campanhas experimentais de medição de temperatura do ar, ao longo de 2 invernos sucessivos, em 1500 edifícios reabilitados, ocupados por famílias de baixos recursos, em Inglaterra, no âmbito do programa “*England’s Warm Front Scheme*”. No âmbito

da reabilitação foram adotadas, entre outras, soluções de reabilitação passiva, que passaram pelo reforço do isolamento da envolvente exterior, de vedação periférica de frinchas em portas e janelas exteriores. A autora avaliou um aumento da temperatura do ar interior no inverno, em termos médios, de 1.6 °C e uma redução do custo do aquecimento do ar ambiente de 7%;

- Gagliano, *et al.* (2013), estudaram o conforto térmico e a eficiência energética de um conjunto de habitação social reabilitado, composto por 54 apartamentos distribuídos por 2 edifícios, localizado em Bronte, na Sicília, em Itália. Entre outras soluções, foi adotado o reforço do isolamento térmico da envolvente exterior com solução do tipo ETICS. Os autores estimam uma redução no valor da energia primária de aquecimento em 9.5 MWh/ano;

- A rede europeia “*Cities action for sustainable housing (Cash)*” agrupa um conjunto de 10 cidades europeias e uma região, em torno de um projeto comum designado por “*Energy Efficiency for Social Housing* (Urbact, 2010)”, que tem por objetivo a criação de um conjunto de princípios de reabilitação térmica dos bairros de habitação social das cidades participantes;

- O programa “*Social Housing Renovation and Retrofit Program (SHRRP)*” (SHRRP, 2013) foi implementado pelo governo canadiano na província de Ontario, com o objetivo de reabilitar 300 edifícios de habitação social. A reabilitação dos edifícios passou, entre outras, pela adoção de soluções de reforço do isolamento de fachadas e coberturas e pela substituição de envidraçados.

Os estudos internacionais citados destacam a importância da adoção de soluções de reabilitação passiva dos edifícios de habitação social, na redução do valor da energia de aquecimento e de arrefecimento, e na obtenção de valores da temperatura do ar interior próximos dos requisitos de conforto térmico.

3

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO EM SERVIÇO

3.1. OBJETIVOS E METODOLOGIAS

Um dos objetivos primordiais da Tese consiste na caracterização do desempenho térmico em serviço, de um conjunto habitacional reabilitado tomado como Caso de Estudo. Para tal, procedeu-se à avaliação das condições de conforto térmico dos ocupantes dos edifícios em condições correntes de utilização e à caracterização da Qualidade do Ar Interior (QAI), através de medição do CO₂, de um Apartamento-Tipo tomado como referência.

A extensão da campanha de medição *in situ* permitiu a recolha de um conjunto alargado de resultados experimentais que possibilitaram, de forma complementar, o estudo da variabilidade do desempenho térmico em serviço e da variabilidade da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos instrumentados.

A campanha experimental obedeceu a um planeamento muito bem definido, tendo para a sua realização sido selecionada uma amostra de apartamentos representativa do conjunto habitacional. A sua implementação assentou na monitorização em contínuo de parâmetros higrotérmicos e da concentração de CO₂, e de forma complementar, num conjunto de medições pontuais da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos da amostra.

Os principais objetivos da caracterização experimental do desempenho térmico em serviço são os seguintes:

- Avaliar a reabilitação construtiva dos edifícios no conforto térmico dos edifícios em condições de serviço;
- Utilizar os resultados obtidos no processo de medição para proceder à validação do modelo de simulação numérica em regime dinâmico (Capítulo 4) que servirá de base ao estudo de sensibilidade desenvolvido no Capítulo 5.

Como objetivos secundários destacam-se os seguintes:

- Avaliar a variabilidade do desempenho térmico em condições de serviço da amostra instrumentada, para um conjunto diversificado de cenários de utilização;
- Avaliar a variabilidade da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos num cenário pós-reabilitação, tendo como base um conjunto de medições pontuais efetuadas com recurso ao ensaio da porta ventiladora.

A metodologia utilizada assentou na seleção de uma amostra composta por 24 apartamentos, escolhidos de modo a poderem ser representativos do conjunto habitacional. Do conjunto dos 24 apartamentos instrumentados foi escolhido 1 de tipologia T3 (tipologia dominante), com 5 ocupantes, para monitorização ao longo de um período de 1 ano, com dispositivos de medição instalados em todos os compartimentos da habitação. Os restantes 23 apartamentos foram monitorizados em períodos do ano distintos: na estação de aquecimento (dezembro, janeiro e fevereiro) e na estação de arrefecimento (julho, agosto e setembro). A avaliação dos parâmetros de medição nos 23 apartamentos foi efetuada em quartos e salas por constituírem locais de permanência dos ocupantes, e como tal suscetíveis de uma avaliação mais profunda das condições de conforto térmico (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 - Metodologia utilizada na medição

Amostra	Período de Medição	Compartimentos
Apartamento-Tipo (1)	1 ano	Quartos, sala, cozinha e WC
Restantes apartamentos (23)	Inverno (dez., jan. e fev.) e verão (julho, agosto e set.)	Quarto e salas

3.2. CARATERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS EM ESTUDO

3.2.1. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O Caso de Estudo analisado é o conjunto habitacional de Lordelo constituído por vários edifícios (Fig. 3.1), localizado na freguesia de Lordelo do Ouro, na cidade do Porto. Os edifícios do conjunto habitacional foram alvo de uma recente ação de reabilitação construtiva da envolvente exterior e das áreas de circulação comuns (de Freitas, 2009).

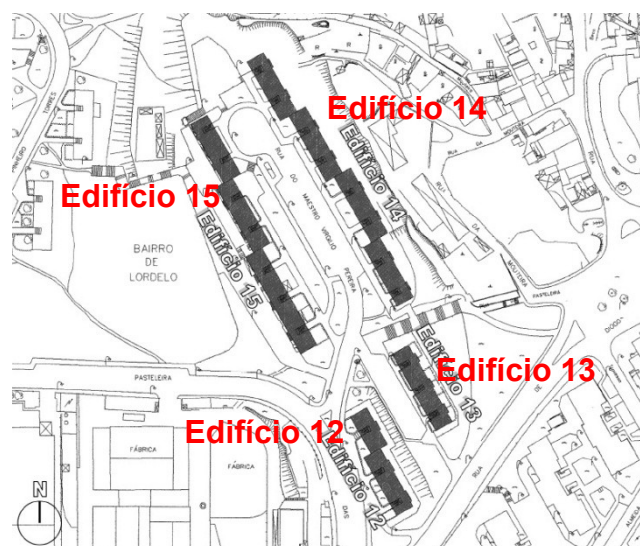


Figura 3.1 – Conjunto habitacional de Lordelo – implantação (adaptado de de Freitas, 2009)

A construção dos edifícios foi concluída em 1978. Os apartamentos apresentam tipologias T1 a T5, num total de 179 apartamentos repartidos conforme apresentado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Tipologia dos apartamentos

Tipologia	N.º apartamentos
T1	19
T2	31
T3	72
T4	56
T5	1

Os edifícios 12, 13 e 14 apresentam 4 pisos elevados. O edifício 15 possui 5 ou 6 pisos, com 1 ou 2 parcialmente enterrados. As Figuras 3.2 a 3.4 representam os edifícios 12 a 15 numa fase anterior à reabilitação implementada.



Figura 3.2 – Alçado lateral-tipo



Figura 3.3 – Alçado posterior-tipo




Figura 3.4 – Alçado principal-tipo

3.2.2. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS “PRÉ-EXISTÊNCIA”

Os edifícios apresentam originalmente as soluções construtivas descritas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Soluções construtivas originais

Fachada Opaca (Zona Corrente)		Parede dupla em alvenaria de tijolo perfurado de face à vista, com 0.11 m de espessura pela face exterior, caixa-de-ar com 4 cm de espessura e pano em alvenaria de tijolo vazado com 0.11 m de espessura pela face interior, rebocado numa das faces com camada de argamassa à base de cimento com 2 cm de espessura e na outra face com camada de estuque com 2 cm de espessura, com uma espessura total de 30 cm ($U = 1.3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
Fachada Opaca (Zonas singulares)		Placas de fibrocimento fixas mecanicamente ao suporte, nos troços de fachada sob os vãos envidraçados das salas e dos quartos superiores.
Vãos Envidraçados		Caixilharia de madeira com vidro simples incolor de 4 mm e proteção solar exterior em estores de PVC de cor branca, com uma configuração distinta entre si: os vãos envidraçados das janelas dos quartos são formados por uma janela de guilhotina, os das janelas das instalações sanitárias por uma janela de batente de uma folha com eixo horizontal ou vertical, sem proteção solar e os vãos envidraçados das janelas das salas são formados por duas janelas de guilhotina ($U = 3.4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
Caixas de Estore		Caixas de estore em madeira sem isolamento térmico nem grelhas de ventilação associadas.

Lavandaria		Grelha composta por elementos cerâmicos. A solução foi alterada, por exemplo, pela introdução de vãos envidraçados com inúmeras configurações.
Cobertura		Chapas de fibrocimento fixas com grampos metálicos à estrutura da cobertura constituída por vigotas prefabricadas de betão apoiadas sobre muretes em alvenaria de tijolo vazado. O desvão das coberturas é ventilado. Sobre o pavimento do desvão ventilado da cobertura, constituído por laje maciça de betão armado com 0.2 m de espessura, não se encontra aplicado qualquer solução de isolamento térmico ($U = 3.4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).
Ventilação		Ventilação permanente com extração de ar nas cozinhas por abertura localizada sobre o fogão, que se reúne numa chaminé coletiva que agrega a totalidade das condutas de exaustão das cozinhas das habitações de cada entrada. Não existem dispositivos de extração de ar nas instalações sanitárias.

3.2.3. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PÓS-REABILITAÇÃO

A reabilitação construtiva dos edifícios incidiu sobre a sua envolvente exterior e áreas de circulação comum.

A intervenção na envolvente opaca exterior envolveu o reforço da resistência térmica da cobertura dos edifícios, o tratamento dos elementos singulares da fachada opaca exterior, com aplicação de isolamento térmico nas caixas de estore e introdução de dispositivos de admissão de ar, e a alteração da solução construtiva dos troços de fachada dispostos entre os vãos envidraçados das salas e dos quartos e as lajes inferiores e superiores, e entre os vãos envidraçados dos quartos de banho e a laje superior.

A intervenção na envolvente envidraçada exterior envolveu a substituição dos vãos envidraçados existentes, com alteração do tipo de caixilharia aplicado, do seu esquema de funcionamento, do tipo de vidro aplicado e da proteção solar exterior.

Complementarmente procedeu-se ao tratamento da envolvente exterior dos corpos em balanço das lavandarias instaladas nas fachadas posteriores dos edifícios e procedeu-se à alteração do sistema de


ventilação com introdução de um sistema de ventilação natural assistida por ventiladores de extração de ar na cozinha e instalações sanitárias (sistema misto).

As principais ações de reabilitação construtiva implementadas encontram-se descritas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Soluções construtivas implementadas (adaptado de de Freitas, 2009)

Caixas de Estore		Caixas de estore em madeira revestidas pelo seu interior com isolamento térmico constituído por painéis rígidos de lã mineral com uma espessura de 20 mm. Aplicação de grelha de ventilação autorregulável para admissão de ar que garantem um caudal variável entre 30 e 45 m ³ /h.
Painéis Prefabricados		Painéis compósitos em alumínio pré-lacado e termo colado sobre uma alma em polietileno, fixos por aparafusamento a estrutura de suporte em aço inox, aplicados sob os vãos de quartos e sala e sobre estes em quartos, sala e instalação sanitária Na caixa-de-ar formada estão aplicados painéis rígidos de poliestireno extrudido com uma espessura de 30 mm. A impermeabilização da face exterior do pano interior de parede é efetuada com uma emulsão betuminosa.
Vãos Envidraçados		Caixilharia de alumínio anodizado à cor natural, com vidro duplo incolor de 6 mm + (10 mm) + 4 mm e proteção solar exterior em estores de alumínio anodizado à cor natural, nas salas, quartos e instalações sanitárias, com a seguinte configuração: nos quartos e nas instalações sanitárias instalou-se janela de batente de uma folha e nas salas janela de correr de duas folhas.

Lavandaria		<p>Caixilharia de alumínio anodizado à cor natural, com vidro simples incolor de 8mm, com a seguinte configuração: janela de correr de duas folhas disposta sobre caixilharia fixa no painel opaco inferior constituído por chapas de alumínio confinando uma placa de poliuretano com 20 mm de espessura.</p> <p>Estrutura metálica de ocultação, incluindo fixação aos elementos laterais de betão dos corpos em balanço e ao pilarete de betão entre lavandarias adjacentes e introdução do estendal. Montagem de um apara-pingas, em chapa de alumínio anodizado à cor natural, com fixação ao topo da laje e à estrutura de ocultação das lavandarias. Criação de aberturas permanentes de ventilação entre os elementos laterais de betão dos corpos em balanço, realizadas em chapa de alumínio anodizado à cor natural.</p>
Cobertura		<p>Cobertura inclinada revestida por painéis "sandwich", compostos por duas chapas metálicas nervuradas e por um núcleo central preenchido com lã mineral com espessura de 30 mm. A ventilação do desvão é garantida por aplicação duas séries de aberturas para entrada e saída de ar em cada vertente, repartidas pela cumeeira e beirais. A cobertura está assente sobre estrutura de suporte constituída por vigotas prefabricadas de betão apoiadas sobre muretes em alvenaria de tijolo vazado. Sobre o pavimento do desvão ventilado da cobertura (laje de betão com 20 cm de espessura) estão aplicados painéis rígidos de isolamento térmico em lã mineral com espessura de 80 mm que revestem os elementos verticais (muretes e chaminés).</p>

Ventilação		<p>Ventiladores mecânicos coletivos associados a relógios programadores que extraem, em regime contínuo, um caudal variável de 125 a 400 m³/h por apartamento, nas cozinhas. Extração de ar nas instalações sanitárias de cada apartamento com ventiladores mecânicos de fachada, com funcionamento contínuo, que extraem um caudal mínimo de 60 m³/h.</p>
------------	---	--

3.3. DESCRIÇÃO DETALHADA DA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO ADOTADA

3.3.1. PLANO DE MEDIÇÕES

O plano de medições implementado envolveu a execução de medições em contínuo da temperatura, T_i , da humidade relativa do ar interior, HR_i , e da concentração de dióxido de carbono (CO_2). Foram efetuados ensaios para medição pontual da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos, com obtenção do indicador taxa de renovação horária a 50 Pa, RPH_{50} . O esquema apresentado na Figura 3.5 resume a estratégia adotada para o plano de medições.

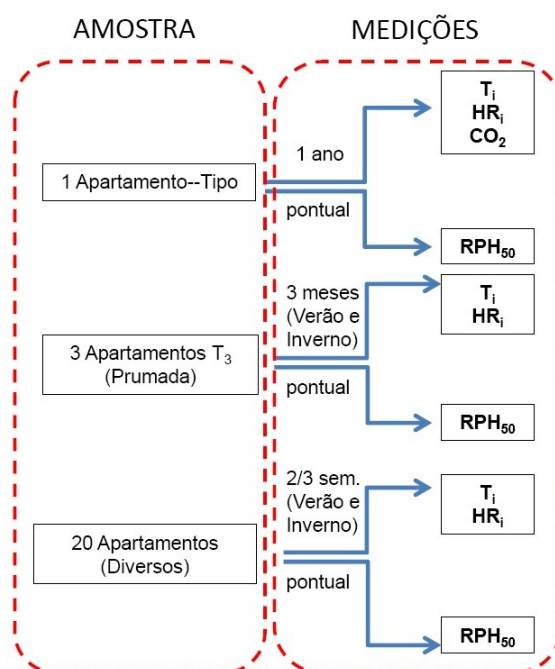


Figura 3.5 – Estratégia adotada para o plano de medições

A metodologia adotada na recolha dos parâmetros de medição e a identificação dos apartamentos instrumentados encontram-se sintetizados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Metodologia adotada no plano de medições

Medição	Período	Apartamento (Edifício/Entrada/Habitação)
“Completa”	1 ano	1 apartamento: 14/56/42
“Curta Duração”	3 meses (verão e inverno)	3 apartamentos: 14/88/42, 14/88/32 e 14/88/12
“Muito Curta Duração”	2 a 3 semanas (verão e inverno)	20 apartamentos: 12/56/41, 12/56/11, 14/56/22, 14/70/22, 14/106/11, 14/126/12, 14/140/41, 14/174/11, 14/174/22, 14/174/42, 15/63/22, 15/63/42, 15/63/41, 15/114/32, 15/114/42, 15/114/21, 15/114/41, 15/125/42, 15/145/32 e 15/159/41

A descrição detalhada do plano de medições adotado é a seguinte:

a) Medição “Completa” do Apartamento-Tipo

Foi selecionado 1 apartamento de tipologia T3 (tipologia dominante), considerado representativo do conjunto existente no local (Figura 3.6). A instrumentação foi estabelecida em condições de serviço ao longo de 1 ano (1 de março de 2012 a 28 de fevereiro de 2013) com realização de medições em contínuo da temperatura e da humidade relativa, em todos os compartimentos da habitação e da concentração de dióxido de carbono (CO_2), num dos quartos e na sala. No dia 20 de maio de 2013 foi efetuada a medição pontual da permeabilidade ao ar da envolvente com o ensaio da porta ventiladora.

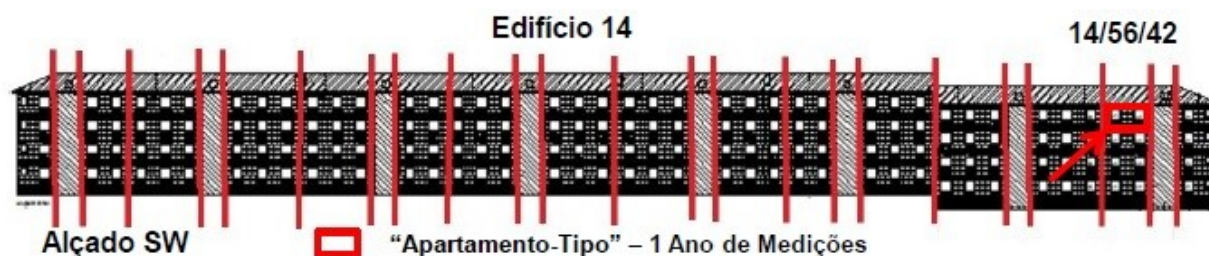


Figura 3.6 – Apartamento-Tipo representado no alçado sudoeste do Edifício 14

b) Medição de “Curta Duração” de 3 Apartamentos (3 Meses)

Foram selecionados 3 apartamentos de tipologia T3 (tipologia dominante) localizados na mesma prumada, com ocupação idêntica, com fachada principal orientada a sudoeste (Figura 3.7). A instrumentação foi estabelecida em condições de serviço, ao longo de 3 meses consecutivos, para as condições climáticas de verão (julho, agosto e setembro de 2012) e de 3 meses consecutivos para as condições climáticas de inverno (dezembro 2012, janeiro e fevereiro de 2013). Nestes apartamentos foram efetuadas medições em contínuo da temperatura e da humidade relativa do ar, em 3 dos compartimentos (sala e 2 quartos com orientações opostas). No dia 20 de maio de 2013 foi efetuada a medição pontual da permeabilidade ao ar da envolvente com o ensaio da porta ventiladora.



Figura 3.7 – Apartamentos T3 dispostos em prumada, representados no alçado sudoeste do Edifício 14

c) Medição de “Muito Curta Duração” de 20 Apartamentos (Períodos de 2 ou de 3 semanas)

Foram selecionados 20 apartamentos de tipologias diversas, com posicionamentos distintos e ocupações diferenciadas, e monitorizados em condições de serviço (Figuras 3.8, 3.9 e 3.10). A instrumentação foi estabelecida em períodos de 2 ou de 3 semanas consecutivas para as condições climáticas de verão (julho, agosto e setembro de 2012) e de inverno (dezembro 2012, janeiro e fevereiro de 2013). Nestes apartamentos foram efetuadas medições em contínuo da temperatura e da humidade relativa do ar interior, em 2 ou 3 dos compartimentos (sala e quarto(s) com orientação oposta). Nos dias 20, 21, 22, 28 e 31 de maio de 2013 foi efetuada a medição pontual da permeabilidade ao ar da envolvente com recurso ao ensaio da porta ventiladora.

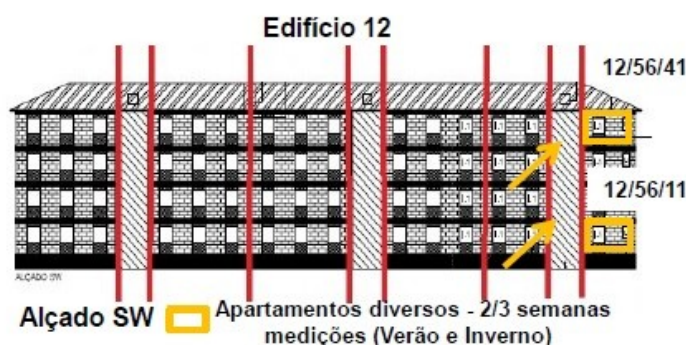


Figura 3.8 – Apartamentos de tipologias diversas representados no alçado sudoeste do Edifício 12



Figura 3.9 – Apartamentos de tipologias diversas representados no alçado sudoeste do Edifício 14



Figura 3.10 – Apartamentos de tipologias diversas representados no alçado nordeste do Edifício 15

3.3.2. DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

Para se implementar *in situ* o plano de medições delineado utilizaram-se equipamentos portáteis para medição da temperatura, humidade relativa, CO₂ e permeabilidade ao ar da envolvente.

Para medição da temperatura e humidade relativa do ar interior, em regime contínuo, foram utilizados os *data loggers* dos seguintes modelos (modelos apresentados na Figura 3.11):

- Modelo *HOBO U12-011*. Em medições de temperatura estes dispositivos garantem um espectro de valores entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, uma precisão de $\pm 0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma resolução de $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$. No registo da humidade relativa garante a medição de um espectro de valores entre 5% e 95% , uma precisão de $\pm 2,50\%$ e uma resolução de $0,03\%$ (Onset, 2013);
- Modelo *HOBO-H08-007-02*. Em medições de temperatura estes dispositivos garantem um espectro de valores entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, uma precisão de $\pm 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma resolução de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. No registo da humidade relativa garante a medição de um espectro de valores entre 0% e 95% , uma precisão de $\pm 5,0\%$ e uma resolução de 1% (Onset, 2013);
- Modelo *COMET SYSTEM | R3120*. Em medições de temperatura estes dispositivos garantem um espectro de valores entre $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, uma precisão de $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma resolução de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. No registo da humidade relativa garante a medição de um espectro de valores entre 5% e 95% , uma precisão de $\pm 2,50\%$ e uma resolução de $0,1\%$ (cometsystem, 2013).

Os dispositivos de medição descritos foram previamente testados e verificados na câmara climática do Laboratório de Física das Construções (LFC) da FEUP (Anexo I).



Figura 3.11 – Data Loggers utilizados para registo da temperatura e da humidade relativa

Para medição da concentração de CO_2 do ar interior, em regime contínuo, foram utilizados dispositivos de medição do modelo *Telaire 7001* (Figura 3.12). Trata-se de equipamentos do tipo Infra Vermelho Não Dispersivo (NDIR) que apresentam uma resolução de $\pm 1\text{ ppm}$ e um erro máximo admissível dado pelo mais elevado dos 2 valores ($\pm 50\text{ ppm}$ ou 5% da leitura). Estes dispositivos de medição estão de acordo com os requisitos constantes da Nota Técnica 2 da ADENE, publicada para apoio às auditorias periódicas de QAI no âmbito do RSECE (ADENE, 2009).

Os dispositivos de medição de CO_2 funcionam associados a um *data logger* *HOBO-H08-007-02* que garante a aquisição e armazenamento de dados. Nas circunstâncias em que o dispositivo de medição de CO_2 é ligado ao *data logger* para recolha da informação, a sua gama de medição torna-se limitada a um *output* máximo de $2,5\text{ V}$, isto é, uma concentração máxima de CO_2 de 2500 ppm .



Figura 3.12 – Analisador da concentração de CO_2

Para medição da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos foi utilizado o ensaio da porta ventiladora. Os componentes do sistema de porta ventiladora adotado nas medições efetuadas são os

seguintes: ventilador *Retrotec 1000* e respetivo tecido estanque de cobertura, estrutura da porta em caixilharia de alumínio com tecido estanque de cobertura, medidor digital do modelo DM-2A e respetivas baterias recarregáveis NiMH, um conjunto de 7 intervalos de fluxo para regulação do caudal, tubos com sonda de pressão estática e cabo de alimentação (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Componentes do sistema Porta Ventiladora adotado

3.3.3. IMPLANTAÇÃO DE DISPOSITIVOS *IN SITU*

A implantação *in situ* dos sensores de temperatura e humidade relativa nos compartimentos a monitorizar, foi estabelecida de modo a evitar a exposição solar direta a partir dos envidraçados. A sua montagem efetuou-se em paredes interiores (ISO, 1998), para evitar o efeito combinado da radiação solar e da temperatura do ar exterior sobre as paredes exteriores, falseando, deste modo, os resultados das medições.

A sua instalação foi efetuada preferencialmente a uma altura de cerca de 1.1 m (ISO, 1998) procurando garantir que para além da influência da radiação solar direta, os sensores não estejam expostos ao arrefecimento anormal provocado por obstáculos exteriores elevados, a infiltrações de ar, devido a portas ou janelas predominantemente abertas e a processos convectivos no interior dos apartamentos ocorridos nos quartos de banho.

Na fase inicial do processo de medição do Apartamento-Tipo, durante um período de 4 meses (março de 2012 a junho de 2012), foram instalados dois sensores de medição de temperatura e de humidade relativa por compartimento, representando um total de 12 sensores, implantados em paredes divisórias opostas. Este procedimento permitiu cruzar leituras e aferir os resultados assim obtidos. Dado que a leitura dos 2 sensores instalados por compartimento se revelou idêntica, volvidos 4 meses foi retirado um sensor por compartimento, permanecendo até final do processo de medição do Apartamento-Tipo um total de 6 sensores (Figura 3.14). Os 2 dispositivos de medição de CO₂ (Figura 3.14) foram instalados num dos quartos de casal e na sala.

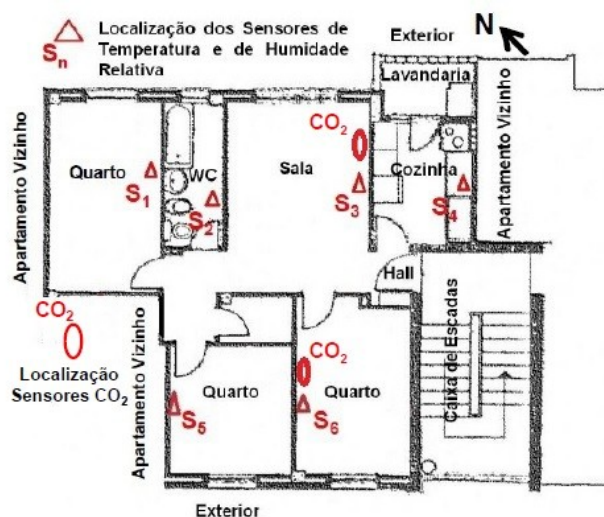


Figura 3.14 – Implantação de sensores para medição “completa” do Apartamento-Tipo

A Figura 3.15 evidencia a localização dos sensores em 2 dos compartimentos do Apartamento-Tipo.



Figura 3.15 – Localização dos sensores na sala e num dos quartos do Apartamento-Tipo

A medição de “Curta Duração” dos 3 apartamentos T3 em prumada foi estabelecida por 3 meses no verão e no inverno, tendo sido instalados 3 sensores de temperatura e humidade relativa por apartamento, na sala e em 2 quartos localizados em fachadas opostas (Figura 3.16).

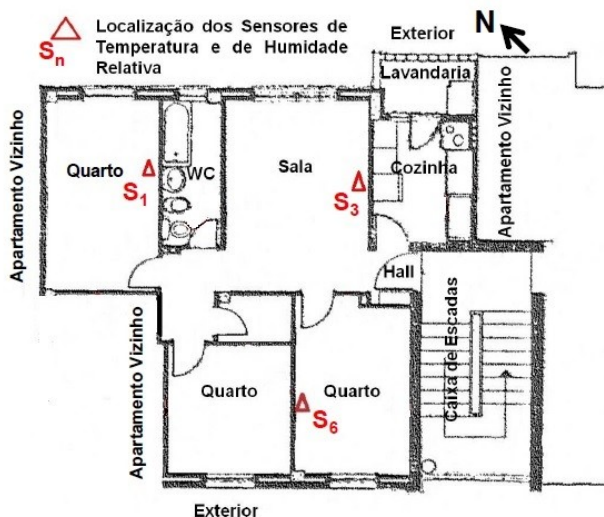


Figura 3.16 – Implantação de sensores para medição reduzida dos apartamentos em prumada de tipologia T3

A medição de “Muito Curta Duração” dos 20 apartamentos de tipologia variada foi efetuada em períodos de duas ou de três semanas, de verão e de inverno, com a instalação de 2 a 3 sensores de temperatura e humidade relativa por apartamento.

Nas Figuras 3.17 e 3.18 representa-se os locais utilizados para implantação dos sensores na sala e quartos de dormir dos apartamentos de tipologia T1 e T4, respetivamente, ambos instrumentados de forma reduzida. Os apartamentos de tipologia T4 têm três quartos orientados a Sudoeste (edifício 14) ou Nordeste (edifício 15) e um quarto orientado a Nordeste (edifício 15) ou Sudoeste (edifício 14). Para analisar o efeito da orientação solar nos resultados de medição foram instrumentados 2 quartos com orientação oposta.

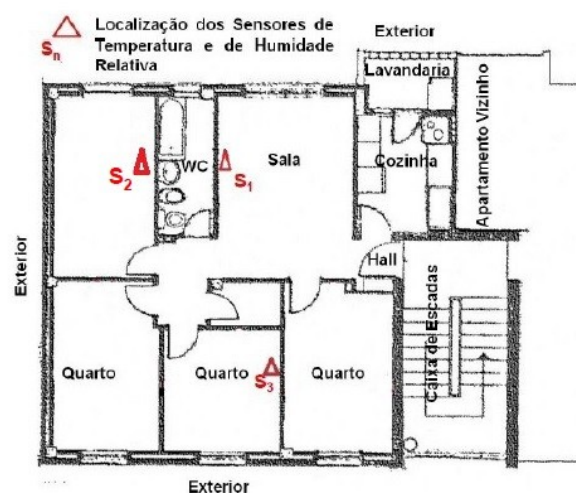


Figura 3.17 – Implantação de 3 sensores para medição de “muito curta duração” de apartamentos de tipologia T4

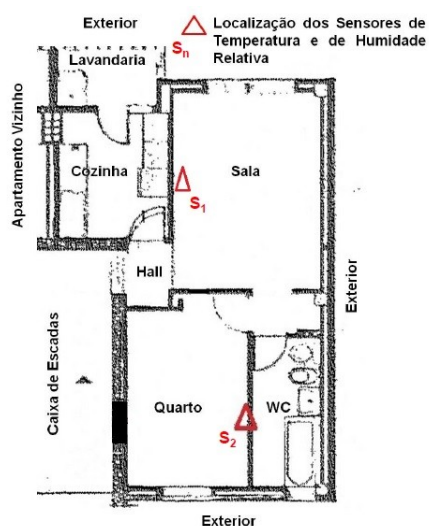


Figura 3.18 – Implantação de 2 sensores para medição de “muito curta duração” de apartamentos de tipologia T1

3.3.4. DADOS CLIMÁTICOS

Para execução do plano de medições estabelecido, dada a proximidade ao local de implantação dos edifícios a monitorizar, foram utilizados dados climáticos obtidos pela estação meteorológica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) do Laboratório de Física das Construções (LFC, 2013).

A estação meteorológica da FEUP constitui um laboratório remoto do tipo sensitivo que permite, de uma forma mais efetiva, contribuir para a caracterização do clima urbano da cidade do Porto. A estação disponibiliza medições espaçadas de 10 minutos das seguintes grandezas físicas (LFC, 2013):

- Temperatura do ar [$^{\circ}\text{C}$];
- Humidade relativa [%];
- Precipitação [mm];
- Velocidade do vento [m/s];
- Direção do vento [graus]. O norte corresponde a 0° e aumenta no sentido dos ponteiros do relógio;
- Pressão atmosférica [bar];
- Radiação solar direta e difusa [W/m^2];
- Radiação atmosférica e terrestre [W/m^2].

Apesar da proximidade ao local, a estação meteorológica da FEUP não se encontra localizada na área de implantação do conjunto habitacional de Lordelo, pelo que as medições por esta disponibilizada, tiveram de ser alvo de validação *in situ*, com a instalação no exterior, ao abrigo do efeito da radiação solar direta e da pluviosidade, de um sensor de temperatura e de humidade relativa. O sensor foi instalado na cobertura do edifício 14, em local devidamente resguardado, por um período contínuo de 3 meses (1/3/2013 a 1/6/2013) (Figura 3.19).



Figura 3.19 – Localização do sensor de temperatura e humidade relativa no exterior

Apresenta-se nas Figuras 3.20 e 3.21 a comparação entre os valores da temperatura e da humidade relativa do ar exterior registados pela estação meteorológica da FEUP e medidos *in situ*, no conjunto habitacional de Lordelo.

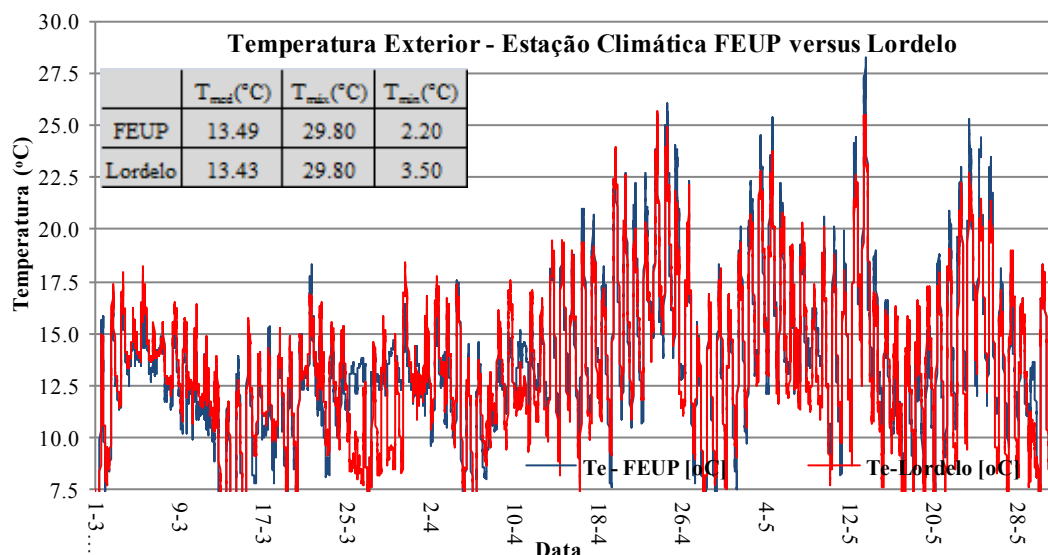


Figura 3.20 – Comparação entre a temperatura do ar medida pela estação meteorológica da FEUP e *in situ*

A análise da Figura 3.20 permite-nos constatar que o valor da temperatura média ar exterior, registada no período entre 1 de março e 1 de junho de 2013, difere apenas de 0.06 °C, com valores máximo e mínimo bastante idênticos para ambos os locais de medição.

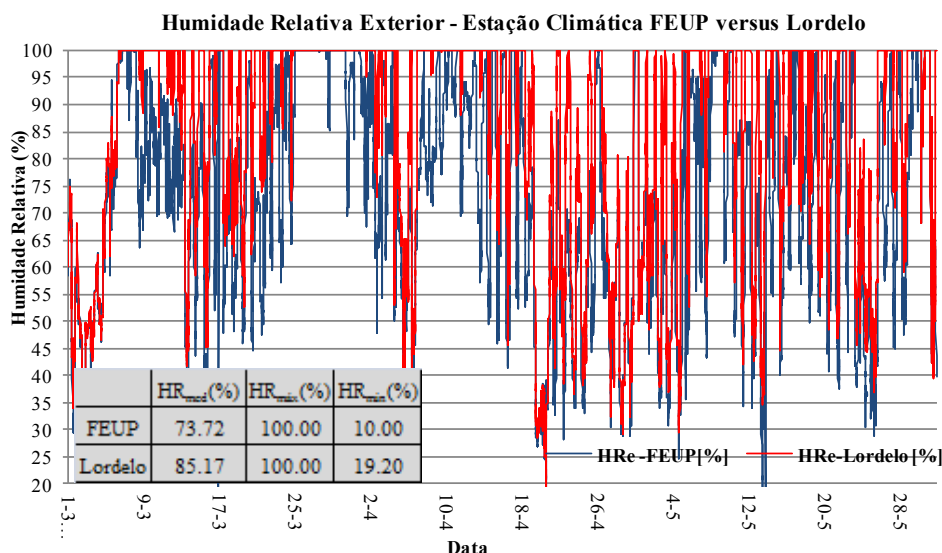


Figura 3.21 – Comparação entre a humidade relativa medida pela estação meteorológica da FEUP e *in situ*

A análise da Figura 3.21 permite observar um valor médio da humidade relativa do ar exterior mais elevado cerca de 12 % para as medições efetuadas *in situ*. A proximidade ao Rio Douro do conjunto habitacional de Lordelo justifica este ligeiro acréscimo no valor da humidade relativa do ar exterior.

A instalação de um sensor de medição da temperatura e da humidade relativa do ar exterior na cobertura de um dos edifícios do conjunto habitacional de Lordelo, por um período de medição contínuo de 3 meses, permitiu validar a utilização de dados climáticos recolhidos na estação meteorológica da FEUP. A proximidade entre o valor da temperatura e humidade relativa do ar exterior, ao longo dos 3 meses do período de análise, para os 2 locais de medição, serviu de base à validação dos dados climáticos recolhidos na estação meteorológica da FEUP e amplamente utilizados na presente Tese.

3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.4.1. ENQUADRAMENTO

O plano de medições implementado envolveu a execução de medições em contínuo da temperatura, da humidade relativa do ar interior, da concentração de dióxido de carbono (CO₂) e de medições pontuais da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos. Da campanha experimental desenvolvida resultou um extenso número de medições cuja apresentação exaustiva tornaria a análise demasiado densa. Neste contexto, são apresentados os resultados de medição considerados mais representativos, sendo disponibilizados no Anexo II da Tese todos os restantes resultados relevantes.

A organização dos resultados adota a seguinte repartição:

- Nos Capítulos 3.4.2.2 e Capítulo 3.4.2.3 é estabelecido o estudo dos resultados de medição da temperatura e humidade relativa do ar interior, de forma respetiva, do Apartamento-Tipo, instrumentado ao longo de 1 ano, em condições de serviço;
- No Capítulo 3.4.3 efetua-se uma avaliação do conforto térmico à luz dos modelos adaptativos de conforto que constam das normas ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) e EN 15251 (CEN, 2007);
- No Capítulo 3.4.4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas medições da concentração de CO₂, indicador da Qualidade do Ar Interior (QAI) do Apartamento-Tipo.

3.4.2. MEDIÇÃO ANUAL DO APARTAMENTO-TIPO

3.4.2.1. ENQUADRAMENTO

A medição do Apartamento-Tipo decorreu no período do ano entre 1 de março de 2012 e 28 de fevereiro de 2013, de forma contínua, com medições espaçadas em intervalos de 10 minutos. Para facilitar a sua identificação, cada 1 dos 6 compartimentos do Apartamento-Tipo foi identificado por um código específico, (Z1 a Z6), conforme representado na Figura 3.22.



Figura 3.22 – Identificação dos compartimentos do Apartamento-Tipo (Z1 a Z6)

Apesar de se ter medido a temperatura do ar interior e a humidade relativa dos 6 compartimentos do Apartamento-Tipo, no Capítulo 3.4.2.2 e Capítulo 3.4.2.3 apresenta-se os resultados relativos a 3 dos compartimentos medidos: a sala de estar com orientação a Nordeste (Z3), o quarto de casal com orientação a Nordeste (Z1) e o outro quarto de casal com orientação a Sudoeste (Z6). Privilegiou-se o

estudo dos compartimentos principais onde a permanência dos ocupantes se faz sentir ao longo de um período de tempo mais alargado. O estudo detalhado do conforto térmico (Capítulo 3.4.3) dos ocupantes torna-se, nestas circunstâncias, mais pertinente.

A medição da concentração de CO₂ foi efetuada apenas na sala de estar com orientação a Nordeste (Z3) e no quarto de casal com orientação a Sudoeste (Z6). No Capítulo 3.4.4 apresenta-se os resultados relativos aos 2 compartimentos medidos.

3.4.2.2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR

As medições efetuadas evidenciam que a temperatura do ar interior varia entre um valor mínimo anual de 14.72 °C, registado no dia 24 de janeiro de 2013, no compartimento Z6, e um valor máximo anual de 30.12 °C, registado no dia 17 de julho de 2012, no compartimento Z6 (Figura 3.23). Na Figura 3.23 estão assinalados com a designação “A” e “B”, 2 registos que merecem um comentário particular:

- O registo “A” assinala um período temporal onde se registam acréscimos bruscos da temperatura do ar interior. Trata-se da semana do Natal (24/12 a 31/12/2012) durante a qual se destaca, no compartimento Z3 (sala a NE), a ocorrência de “picos” de temperatura. Trata-se de períodos de aquecimento do ar ambiente que ocorrem de forma muito esporádica, estabelecidos predominantemente em períodos festivos de reunião familiar;
- O registo “B” representa um período temporal onde a temperatura do ar interior nos 3 compartimentos ronda os 30 °C. Trata-se uma semana intermédia de julho (15/7 a 22/7/2012) onde a temperatura do ar exterior no Porto alcançou valores anormalmente elevados (38.5 °C às 15:00 do dia 17/7/2012).

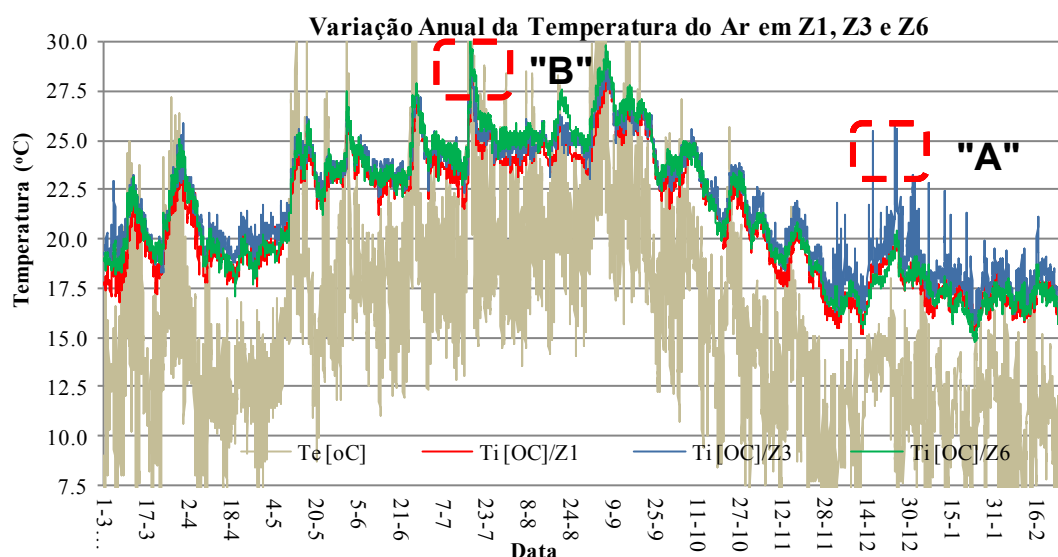


Figura 3.23 – Variação anual da temperatura do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6

No gráfico da Figura 3.24 amplia-se o traçado da temperatura do ar interior para o período do ano entre 24 e 31 de dezembro de 2012, correspondente à semana do Natal (registo “A”). É agora perceptível de forma mais clara a existência de “picos” de temperatura no compartimento Z3 (sala a NE), particularmente evidentes no dia de Natal. A temperatura do ar interior atinge neste período um valor máximo de 25.84 °C, valor alcançado às 0:00 do dia 25/12.

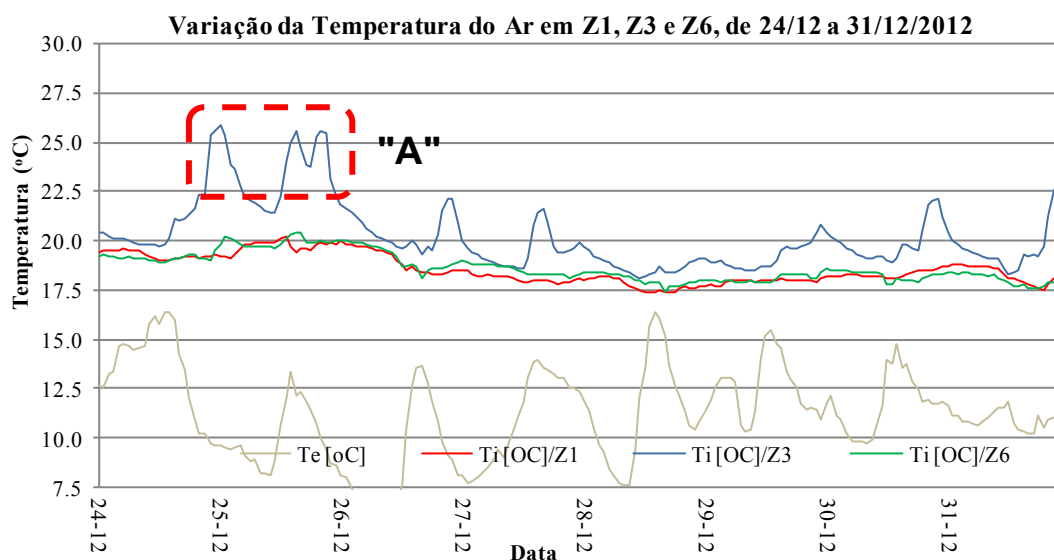


Figura 3.24 – Variação da temperatura do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 24 e 31/12

No gráfico da Figura 3.25 amplia-se o traçado da temperatura do ar interior para o período do ano entre 15 e 22 de julho de 2012, correspondente à semana intermédia do mês de julho durante a qual se registou temperaturas do ar exterior mais elevadas (registo “B”). Destaca-se, nos dias 17 e 18/7, um valor da temperatura do ar interior a rondar os 30 °C com particular incidência no compartimento Z6 (Quarto a SW). A temperatura do ar interior atinge neste período um valor máximo de 30.12 °C, valor alcançado às 18:00 do dia 17/07, quarto orientado a poente (compartimento Z6).

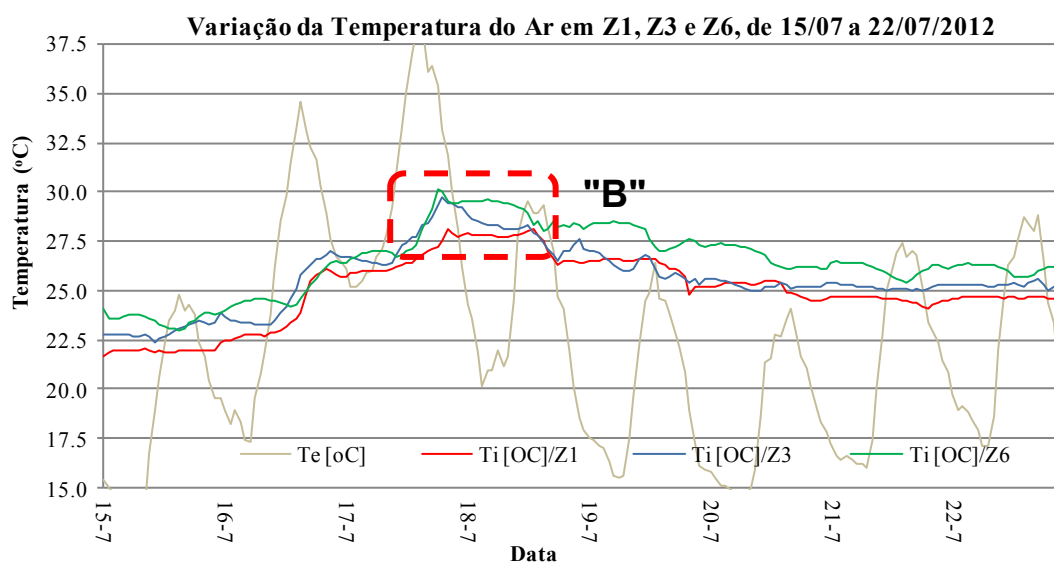


Figura 3.25 – Variação da temperatura do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 15 e 22/7

No Quadro 3.6 apresenta-se os valores das temperaturas mínima, máxima e média para os 3 compartimentos analisados ao longo da estação de aquecimento. A estação de aquecimento para a cidade do Porto dura 6.7 meses (RCCTE, 2006). Considerando as condições nominais preconizadas no RCCTE (RCCTE, 2006), a estação de aquecimento inicia-se no dia 1 de outubro e termina a 20 de abril. A análise dos resultados permite constatar que o valor da temperatura média do ar interior é próxima dos 19 °C para os 3 compartimentos analisados. Sublinha-se que o valor é alcançado na ausência quase total de aquecimento ambiente ao longo da estação de aquecimento, o qual acontece de

forma muito esporádica e apenas em períodos festivos de reunião familiar. O valor da temperatura máxima excede os 25 °C nos 3 compartimentos e o valor da temperatura mínima ronda os 15 °C.

Quadro 3.6 - Temperatura mínima, máxima e média para a estação de aquecimento (Z1, Z3 e Z6)

Estação aquecimento (M/h)	Cenário	Compartimento	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	T_{med} (°C)
6.7 m /4848h	Experimental	Z1(Q-NE)	14.91	25.09	18.80
		Z3 (S-NE)	15.58	25.84	19.77
		Z6(Q-SW)	14.72	25.14	19.18

O gráfico da Figura 3.26 representa para um dos compartimentos instrumentados (Z6-Quarto a SW), o valor mensal das temperaturas mínima, média e máxima ao longo da estação de aquecimento. De destacar que para os 3 meses típicos de inverno (dezembro, janeiro e fevereiro) a temperatura média do ar interior ronda, na ausência de aquecimento ambiente no quarto, os 17 °C (17,70 °C em dezembro, 16,99 °C em janeiro e 17,06 °C em fevereiro). Trata-se de um quarto de casal ocupado por idosos, com ganhos internos que se devem à iluminação e a um equipamento de televisão.

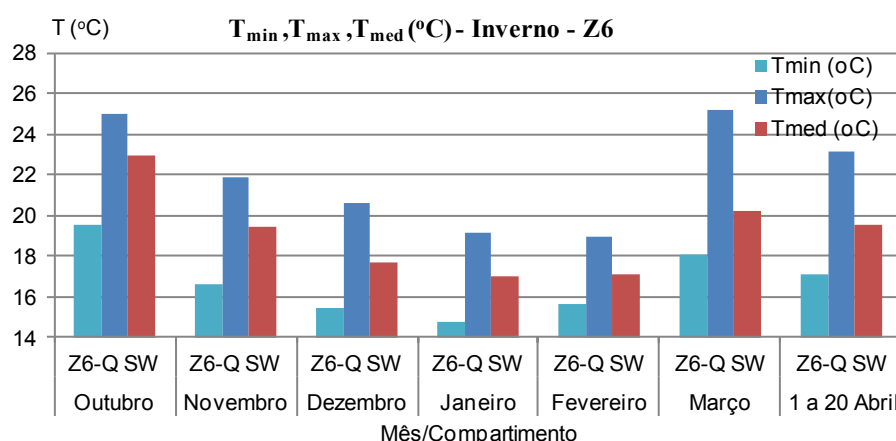


Figura 3.26 – Temperatura mínima, máxima e média mensal em Z6, na estação de aquecimento

No Quadro 3.7 apresenta-se os valores das temperaturas mínima, máxima e média para os 3 compartimentos analisados, ao longo da estação de arrefecimento (1 de junho a 30 de setembro), considerando as condições nominais preconizadas no RCCTE (RCCTE, 2006). A análise dos resultados permite constatar que o valor da temperatura média do ar interior é próximo dos 25 °C para os 3 compartimentos analisados, cenário que se enquadra nas condições ambientais de conforto para a estação de arrefecimento preconizadas pelo RCCTE (RCCTE, 2006). O valor da temperatura máxima excede os 30 °C em apenas 1 dos compartimentos (Z6) e o valor da temperatura mínima ronda os 22 °C nos 3 compartimentos.

Quadro 3.7 - Temperatura mínima, máxima e média para a estação de arrefecimento (Z1, Z3 e Z6)

Estação arrefecimento (M/h)	Cenário	Compartimento	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	T_{med} (°C)
4.0 m /2927h	Experimental	Z1(Q-NE)	21.22	28.67	24.41
		Z3 (S-NE)	22.08	29.72	24.93
		Z6(Q-SW)	22.01	30.12	25.27

O gráfico da Figura 3.27 representa para um dos compartimentos instrumentados (Z6-Quarto a SW), o valor mensal das temperaturas mínima, média e máxima ao longo da estação de arrefecimento. Excetuando o mês de setembro ($T_{med} = 26.50$ °C), nos restantes meses de verão a temperatura média do

ar interior ronda os 25 °C (23.62 °C em junho, 24.87 °C em julho e 25.25 °C em agosto). O valor da temperatura máxima apenas excede os 30 °C em julho.

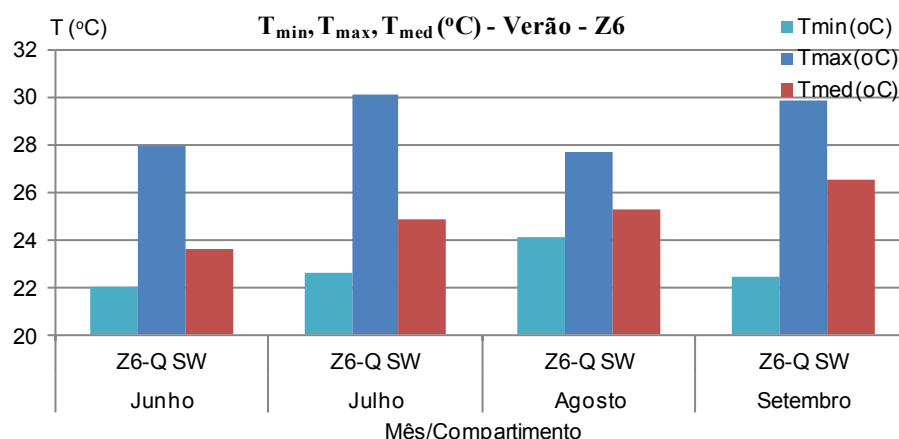


Figura 3.27 – Temperatura mínima, máxima e média mensal em Z6, na estação de arrefecimento

A elevada quantidade de medições recolhidas da temperatura do ar, aconselha a que se proceda à representação dos resultados de medição, para as estações de aquecimento e de arrefecimento, recorrendo a curvas de frequências acumuladas das temperaturas do ar interior.

A Figura 3.28 representa, no mesmo gráfico, as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior no compartimento Z6 (Quarto a SW) e da temperatura do ar exterior, para a estação de aquecimento. No gráfico da Figura 3.28 encontra-se marcada a temperatura mínima de conforto para a estação de aquecimento, para edifícios das Categorias II e III, de acordo com o especificado na EN 15251 (CEN, 2007). Os valores assinalados (20 °C e 18 °C para as Categorias II e III, respetivamente) correspondem às temperaturas operativas de conforto especificadas para apartamentos de edifícios residenciais (CEN, 2007). Considerou-se que para os objetivos da Tese se considera razoável a utilização da temperatura de medição como aproximação da temperatura operativa.

O traçado da curva de frequências acumuladas do compartimento Z6 segue com paralelismo o traçado da curva correspondente à temperatura do ar exterior, o que significa que a variação da temperatura do ar exterior se repercute de forma marcada na variação da temperatura do ar interior.

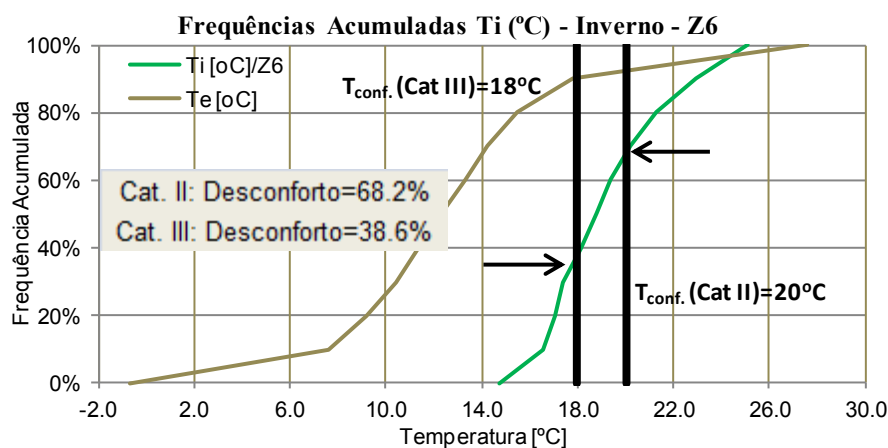


Figura 3.28 – Curva de frequências acumuladas de temperatura do ar em Z6, na estação de aquecimento

No Quadro 3.8 registam-se os valores da temperatura do ar interior correspondentes aos percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90, e a percentagem de horas do total existente na estação de aquecimento (4848 h), em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor do limite de conforto

especificado para as Categorias II e III (20 °C e 18 °C, respetivamente), Para o compartimento Z6 o valor da mediana é de 18.8 °C (T_{10} =16.6 °C e T_{90} =22.9 °C). Para uma Categoria III da EN 15251 (CEN, 2007), em 38.6 % do total de horas da estação de aquecimento não se atinge a temperatura correspondente ao limite de conforto de 18 °C (68.2 % para Categoria II).

Quadro 3.8 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de aquecimento (Z1, Z3 e Z6)

Est.Aquec (M/h)	Cenário	Compart.	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)	$F_{acum}(T_i=20^{\circ}\text{C})$	$F_{acum}(T_i=18^{\circ}\text{C})$
6.7 m /4848h	Experim.	Z1(Q-NE)	16.3	18.4	22.2	73.2%	42.5%
		Z3 (S-NE)	17.2	19.5	23.1	59.6%	24.2%
		Z6(Q-SW)	16.6	18.8	22.9	68.2%	38.6%

A Figura 3.29 representa, no mesmo gráfico, as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior no compartimento Z6 (Quarto a SW) e da temperatura do ar exterior, para a estação de arrefecimento. Os valores assinalados (26 °C e 27 °C para as Categorias II e III, respetivamente) correspondem às temperaturas operativas de conforto especificadas como limite de aceitabilidade para apartamentos de edificios residenciais (CEN, 2007). A curva representada apresenta um desenvolvimento pouco “alongado” o que se traduz numa baixa amplitude térmica no compartimento Z6 ao longo da estação de arrefecimento.

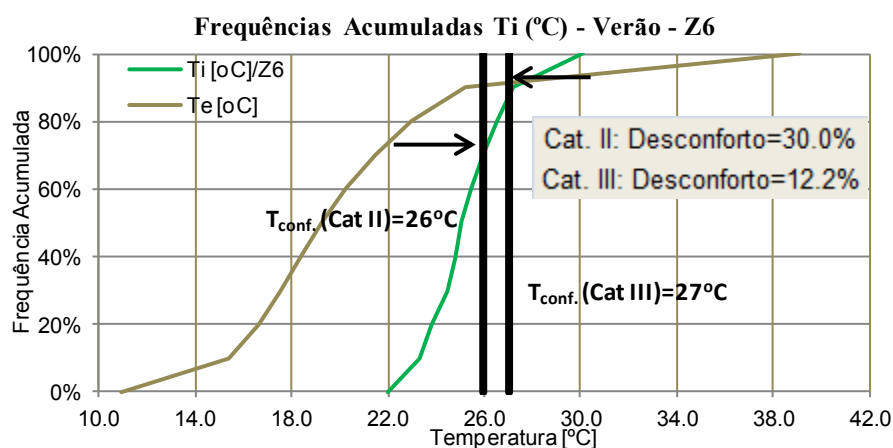


Figura 3.29 – Curva de frequências acumuladas de temperatura do ar em Z6, na estação de arrefecimento

No Quadro 3.9 registam-se os valores da temperatura do ar interior correspondentes aos percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90, e a percentagem de horas do total existente na estação de arrefecimento (2928 h), em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor do limite de conforto especificado para as Categorias II e III (26 °C e 27 °C, respetivamente), Para o compartimento Z6 o valor da mediana é de 25.1 °C (T_{10} =23.3 °C e T_{90} =27.2 °C). Para uma Categoria III da ISO 15251 (CEN, 2007), em 87.8 % do total de horas da estação de arrefecimento não se atinge a temperatura correspondente ao limite de conforto de 27 °C (70.0 % para Categoria II).

Quadro 3.9 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Z1,Z3 e Z6)

Est.Arref. (M/h)	Cenário	Compart.	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)	$F_{acum}(T_i=26^{\circ}\text{C})$	$F_{acum}(T_i=27^{\circ}\text{C})$
4.0 m /2928h	Experim.	Z1(Q-NE)	22.8	24.2	26.3	86.5%	95.7%
		Z3 (S-NE)	23.4	24.8	26.6	80.7%	93.1%
		Z6(Q-SW)	23.3	25.1	27.2	70.0%	87.8%

3.4.2.3. MEDIÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA DO AR INTERIOR

As medições efetuadas evidenciam que a humidade relativa do ar interior varia entre um valor mínimo anual de 22.10 %, registado no dia 28 de março de 2012, no compartimento Z3, e um valor máximo anual de 89.94 %, registado no dia 27 de janeiro de 2013, no compartimento Z1 (Figura 3.30). Na Figura 3.30 estão assinalados com a designação “A” e “B”, os 2 registos já identificados para a temperatura do ar interior no Capítulo 3.4.2.2:

- O registo “A” correspondente ao período entre 24/12 e 31/12/2012. Neste período regista-se um acréscimo assinalável no valor da temperatura do ar interior no compartimento Z3 devido à existência de aquecimento ambiente na sala. A humidade relativa na sala decresce para um valor próximo dos 60 %;
- O registo “B” correspondente ao período entre 15/7 e 22/7/2012. Neste período regista-se um valor da temperatura do ar interior nos 3 compartimentos próximo dos 30 °C. A humidade relativa nos 3 compartimentos decresce para um valor inferior a 40 %.

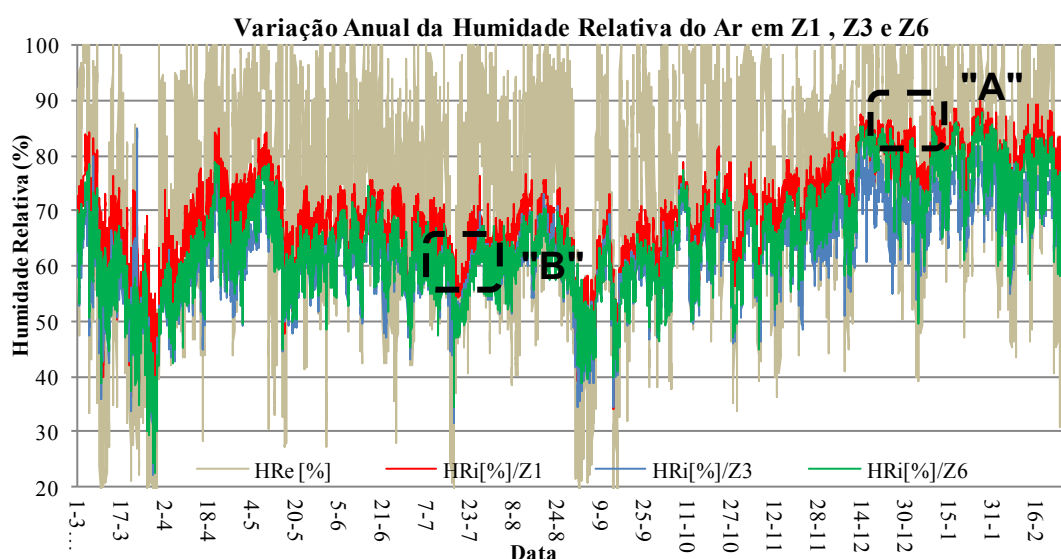


Figura 3.30 – Variação anual da humidade relativa do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6

No gráfico da Figura 3.31 amplia-se o traçado da humidade relativa do ar interior para o período do ano entre 24 e 31 de dezembro de 2012, correspondente à semana do Natal (registo “A”). A humidade relativa do ar no compartimento Z3, às 0:00 do dia 25/12, é de 60.86 % (a temperatura do ar interior atinge um valor máximo de 25.84°C).

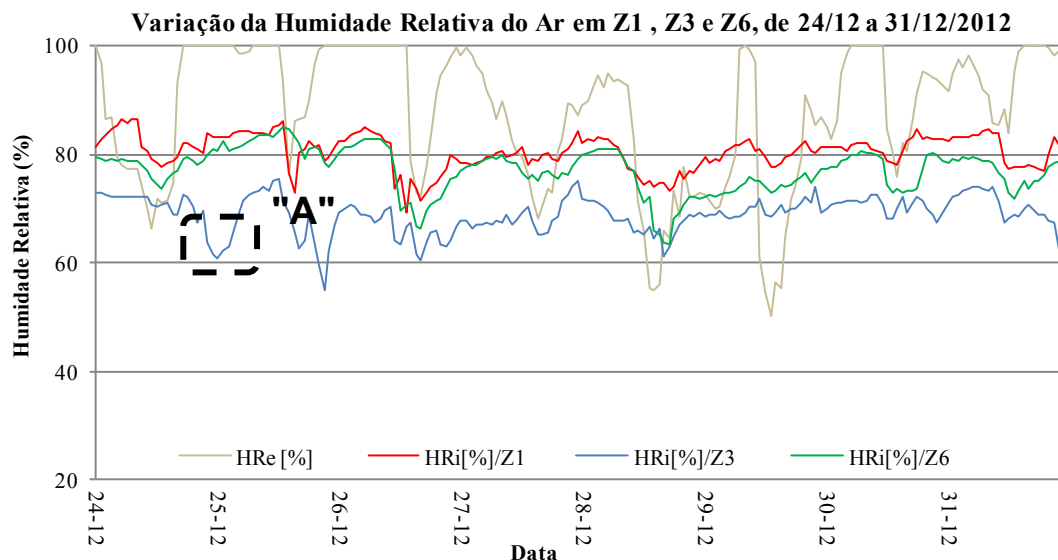


Figura 3.31 – Variação da humidade relativa do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 24 e 31/12

No gráfico da Figura 3.32 é avaliado o risco de condensações superficiais na parede de fachada dos compartimentos Z1, Z3 e Z6, no período do ano entre 24 e 31 de dezembro de 2012. As curvas referentes à temperatura superficial interior, T_{si} , nos 3 compartimentos, apresentam-se acima das referentes à temperatura de ponto de orvalho, θ_{po} , pelo que o risco de condensações superficiais é nulo.

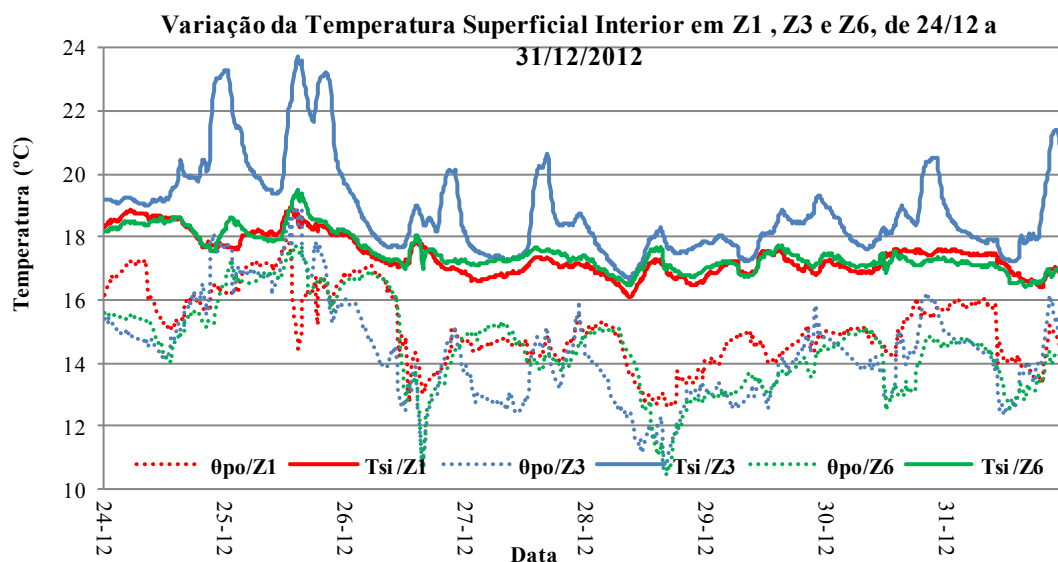


Figura 3.32 – Variação da temperatura superficial interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 24 e 31/12

No gráfico da Figura 3.33 amplia-se o traçado da humidade relativa do ar interior para o período do ano entre 15 e 22 de julho de 2012 (registo “B”). A humidade relativa do ar no compartimento Z6, às 18:00 do dia 17/07, é de 34.90 % (a temperatura do ar interior atinge um valor máximo de 30.12 °C). A humidade relativa do ar exterior nesse período é de 19.30 %.

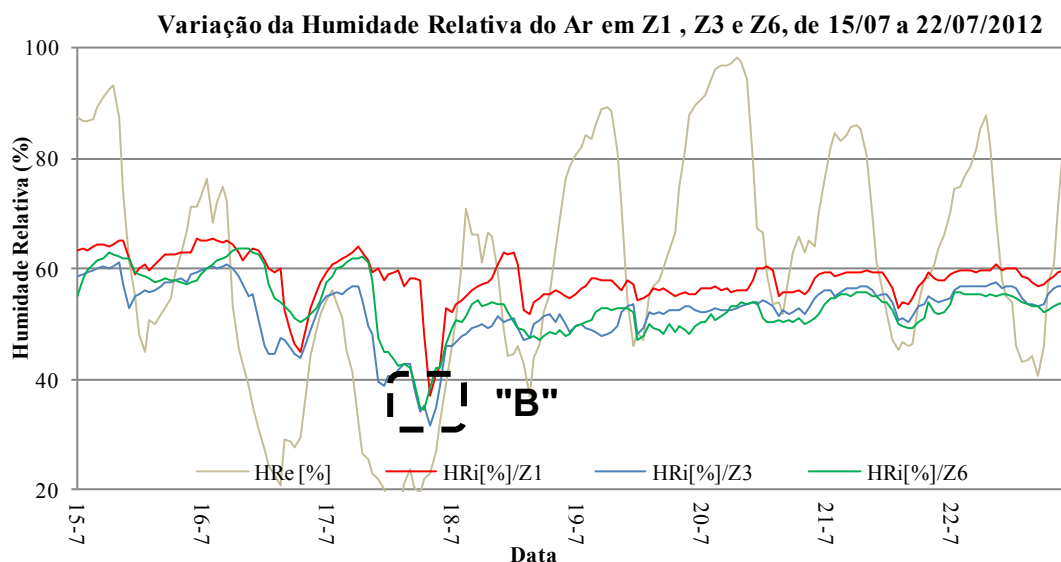


Figura 3.33 – Variação da humidade relativa do ar interior nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, entre 15 e 22/7

A Figura 3.34 representa, no mesmo gráfico, as curvas de frequência acumulada da humidade relativa do ar interior no compartimento Z6 (Quarto a SW) e da humidade relativa do ar exterior, para a estação de aquecimento. De registar a grande amplitude no valor da humidade relativa do ar interior, com variação entre valores próximos de 20 % (22.10 % a 28/3/2012) e de 90 % (89.94 % no dia 27/1/2013). O paralelismo entre curvas de frequências acumuladas (compartimento Z6 e humidade relativa exterior) não é tão evidente quanto o relativo à temperatura, pelo que se pode afirmar que a variação da humidade relativa exterior não se repercute de forma tão evidente no valor da humidade relativa interior.

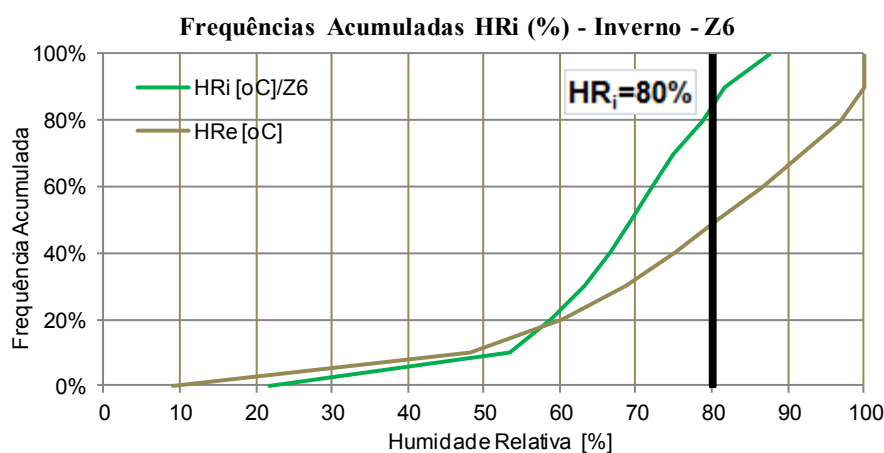


Figura 3.34 – Curva de frequências acumuladas de humidade relativa em Z6, na estação de aquecimento

No Quadro 3.10 regista-se os valores da humidade relativa do ar interior na estação de aquecimento, correspondente aos percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90. Para o compartimento Z6 o valor da mediana é de 69.4 % ($HR_{10}=53.4$ % e $HR_{90}= 81.8\%$). O valor referente ao percentil 90 é próximo dos 80 %, pelo que em 10 % do tempo da estação de aquecimento registam-se valores de humidade relativa superiores a 80%. O risco de formação de bolores na envolvente exterior, de acordo com a norma EN ISO 13788 (CEN, 2001), ocorre para valores de HR_i superiores a 80 %. Este cenário ocorre em cerca de 10 % da duração da estação de aquecimento.

Quadro 3.10 - Frequências acumuladas de humidade relativa na estação de aquecimento (Z1, Z3 e Z6)

Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Compartimento	HR_{10} (%)	HR_{50} (%)	HR_{90} (%)
6.7 m /4848h	Experimental	Z1(Q-NE)	59.3	73.7	84.1
		Z3 (S-NE)	52.4	65.3	75.2
		Z6(Q-SW)	53.4	69.4	81.8

A Figura 3.35 representa, no mesmo gráfico, as curvas de frequência acumulada da humidade relativa do ar interior na estação de arrefecimento, no compartimento Z6 (Quarto a SW) e da humidade relativa do ar exterior, para a estação de arrefecimento. A humidade relativa do ar interior varia entre valores próximos de 35 % (34.39 % em 17/7/2012) e valores próximos de 75 % (74.56 % em 16/6/2012). Não há risco de formação de bolores, dado que os valores de HR_i são sempre inferiores a 80 %.

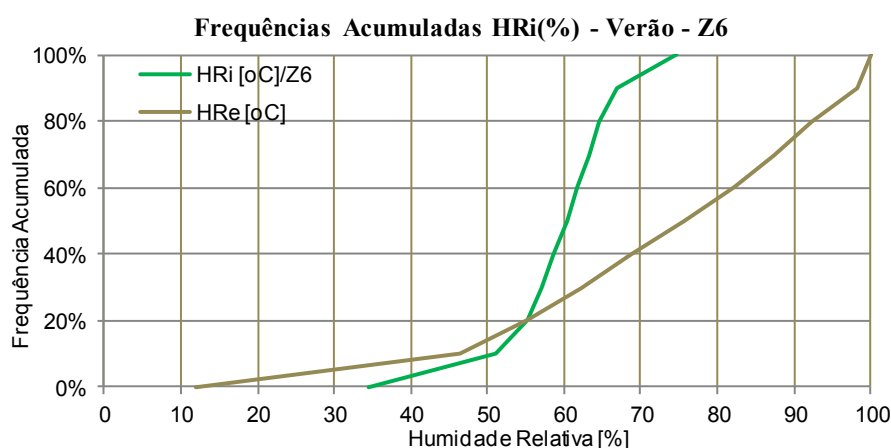


Figura 3.35 – Curva de frequências acumuladas de humidade relativa em Z6, na estação de arrefecimento

No Quadro 3.11 regista-se o valor da humidade relativa do ar interior na estação de arrefecimento, correspondente aos percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90. Para o compartimento Z6 o valor da mediana é de 60.3 % (HR_{10} =51.1 % e HR_{90} =66.8 %). As condições ambientais de conforto para a estação de arrefecimento, preconizadas pelo RCCTE (RCCTE, 2006), referem um valor de referência para a humidade relativa do ar interior de 50 %. À luz deste critério o valor da humidade relativa do compartimento Z6 (Quarto a SW) é consideravelmente elevado, dado que em apenas 10 % do tempo referente à estação de arrefecimento, o seu valor não excede 51.1 %.

Quadro 3.11 - Frequências acumuladas de humidade relativa na estação de arrefecimento (Z1, Z3 e Z6)

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Compartimento	HR_{10} (%)	HR_{50} (%)	HR_{90} (%)
4.0 m /2928h	Experimental	Z1(Q-NE)	54.9	64.8	71.3
		Z3 (S-NE)	49.8	59.8	66.2
		Z6(Q-SW)	51.1	60.3	66.8

3.4.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

3.4.3.1. INTRODUÇÃO

Recorreu-se na Tese à utilização de 2 modelos adaptativos de conforto térmico: o modelo especificado na EN 15251 (CEN, 2007) e o modelo especificado na ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010). Ambos os modelos incluem a temperatura operativa como dado de entrada. Considerou-se como válida a

utilização da temperatura de medição como aproximação à temperatura operativa, dado que a norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) elenca um conjunto de simplificações que torna válida a utilização da temperatura do ar interior como representativo da temperatura operativa.

3.4.3.2. MODELO ADAPTATIVO - EN 15251

O modelo adaptativo que consta da norma EN 15251 (CEN, 2007) é aplicável a edifícios sem sistemas de aquecimento e de arrefecimento instalados. O modelo assenta no cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , em função da temperatura média exterior exponencialmente ponderada, T_{mp} , corrigindo-a com um fator de correção que varia entre $\pm 2^\circ\text{C}$ e $\pm 4^\circ\text{C}$. O fator de correção é obtido em função da categoria do edifício (Categoria I, II, III e IV). As categorias são atribuídas tendo como base a sensação de conforto dos ocupantes e o grau de exigência dos edifícios (CEN, 2007). O conjunto habitacional de Lordelo do Ouro é composto por edifícios de habitação social reabilitados, pelo que se enquadra na Categoria III da norma.

O gráfico da Figura 3.36 ilustra o estudo do conforto térmico à luz da EN 15251, no compartimento Z6 (Quarto a SW), para a estação de aquecimento. Cada ponto no gráfico corresponde a um dos resultados de medição, espaçados entre si de 10 minutos, obtidos entre 1 de outubro de 2012 e 20 de abril de 2013.

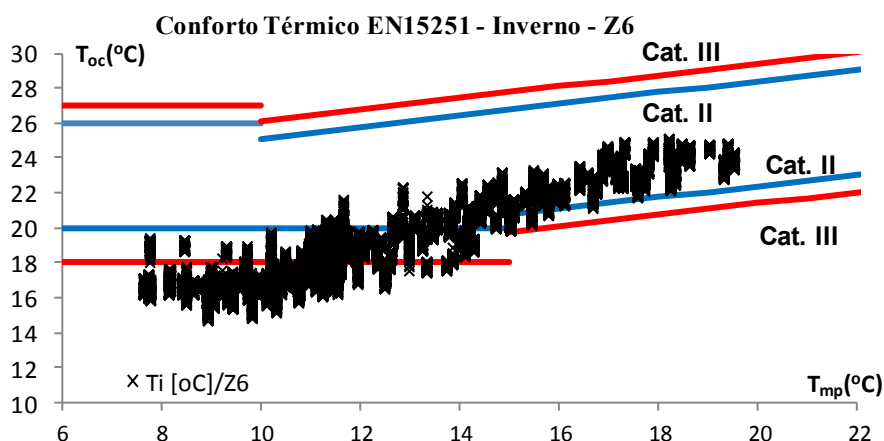


Figura 3.36 – Conforto térmico à luz da EN 15251 em Z6, na estação de aquecimento

No Quadro 3.12 regista-se o número de horas de desconforto para a estação de aquecimento nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, para as Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007) e respetivas percentagens face ao número total de horas da estação de aquecimento. Ressalta-se que em apenas 38.6 % do tempo se regista, para o compartimento Z6, um cenário de desconforto térmico (42.8 % para Z1 e 24.2 % para Z3). Considerando que os ocupantes do Apartamento-Tipo não têm práticas de aquecimento do ar ambiente (esporádico e em períodos festivos), é possível alcançar o conforto térmico em cerca de 2/3 da duração da estação de aquecimento.

Quadro 3.12 - Conforto térmico à luz da EN 15215, para Z1, Z3 e Z6, na estação de aquecimento

Est.Aquec.(M/h)	Cenário	Compart.	Desconforto (h) Cat.III	Desconforto (h) Cat.II	% Cat.III	% Cat.II
6.7 m /4848h	Experimental	Z1(Q-NE)	2073.8	3683.3	42.8	76.0
		Z3 (S-NE)	1171.0	2889.0	24.2	59.6
		Z6(Q-SW)	1869.7	3340.3	38.6	68.9

O gráfico da Figura 3.37 ilustra o estudo do conforto térmico no compartimento Z6 (Quarto a SW) para a estação de arrefecimento. Cada ponto no gráfico corresponde a um dos resultados de medição, espaçados entre si de 10 minutos, obtidos entre 1 de junho de 2012 e 30 de setembro de 2012.

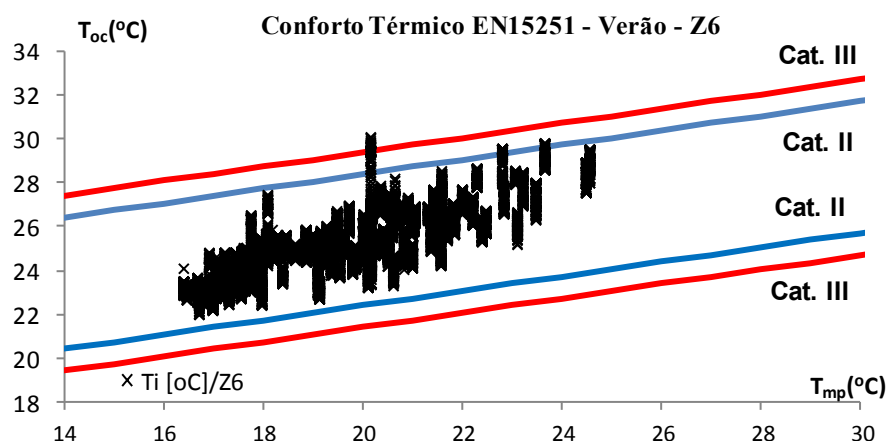


Figura 3.37 – Conforto térmico à luz da EN 15251 em Z6, na estação de arrefecimento

No Quadro 3.13 regista-se o número de horas de desconforto para a estação de arrefecimento nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, para as Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007) e respetivas percentagens face ao número total de horas da estação de arrefecimento. Ressalta-se que para a totalidade dos compartimentos analisados não há cenário de desconforto térmico. Considerando, ainda assim, que o edifício se enquadraria na Categoria II da EN 15251 (CEN, 2007), a percentagem de desconforto atingiria, para o compartimento Z6, um valor de 0.8 %.

Quadro 3.13 - Conforto térmico à luz da EN 15215, para Z1, Z3 e Z6, na estação de arrefecimento

Est.Arref.(M/h)	Cenário	Compart.	Desconforto (h) Cat.III	Desconforto (h) Cat.II	% Cat.III	% Cat.II
4.0 m /2928h	Experimental	Z1(Q-NE)	0.0	0.0	0.0	0.0
		Z3 (S-NE)	1.5	7.5	0.05	0.3
		Z6(Q-SW)	4.8	22.2	0.1	0.8

3.4.3.3. MODELO ADAPTATIVO – ASHRAE 55

O modelo adaptativo que consta da norma ASHRAE 55 (CEN, 2007) é aplicável a edifícios condicionados naturalmente onde os seus ocupantes podem livremente adaptar o seu vestuário às condições ambientais interiores ou exteriores. O modelo assenta no cálculo da temperatura operativa de conforto, T_{oc} , em função da temperatura média mensal exterior, T_m , corrigindo-a com um fator de correção que varia entre ± 2.5 °C e ± 3.5 °C. O fator de correção é obtido em função do limite de aceitabilidade considerado (80% ou 90%). Destaca-se que modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (CEN, 2007) aplica-se a cenários de temperatura média mensal exterior superior a 10 °C.

O gráfico da Figura 3.38 ilustra o estudo do conforto térmico à luz da ASHRAE 55, no compartimento Z6 (Quarto a SW), para a estação de aquecimento. A observação atenta do gráfico permite constatar a existência de 7 alinhamentos verticais de registos de medição sobrepostos. A análise do conforto térmico à luz do modelo da ASHRAE 55 estabelece-se em função da temperatura média mensal exterior, T_m . Os 7 alinhamentos verticais correspondem, desta forma, aos meses de outubro a abril.

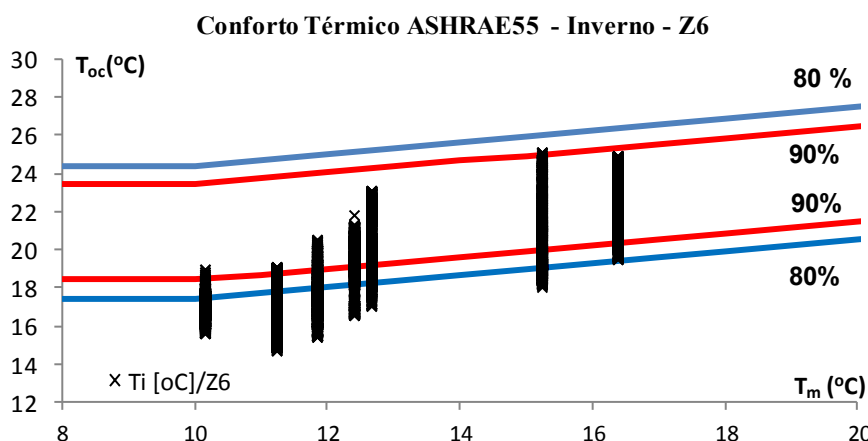


Figura 3.38 – Conforto térmico à luz da ASHRAE 55 em Z6, na estação de aquecimento

No Quadro 3.14 regista-se o número de horas de desconforto para a estação de aquecimento nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, para os limites de 80 % e 90 % de aceitabilidade que constam da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) e respetivas percentagens face ao número total de horas da estação de aquecimento. Ressalta-se que os valores são muito idênticos aos obtidos por aplicação do modelo da EN 15251. Em apenas 38.3 % do tempo de medição se regista, para o compartimento Z6, um cenário de desconforto térmico (44.7 % para Z1 e 20.6 % para Z3). A proximidade entre os resultados obtidos por aplicação de 2 modelos distintos credibiliza o estudo desenvolvido.

Quadro 3.14 - Conforto térmico à luz da ASHRAE 55, para Z1, Z3 e Z6, na estação de aquecimento

Est.Aquec. (M/h)	Cenário	Compart.	Desconforto (h) 80% aceitabilidade	Desconforto (h) 90% aceitabilidade	% 80%	% 90%
6.7 m /4848h	Experimental	Z1(Q-NE)	2168.5	3260.5	44.7	67.3
		Z3 (S-NE)	996.7	2173.8	20.6	44.8
		Z6(Q-SW)	1855.2	2917.7	38.3	60.2

O gráfico da Figura 3.39 ilustra o estudo do conforto térmico no compartimento Z6 (Quarto a SW) para a estação de arrefecimento. Estão representados 4 alinhamentos verticais de registos de medição sobrepostos correspondentes aos meses de junho a setembro.

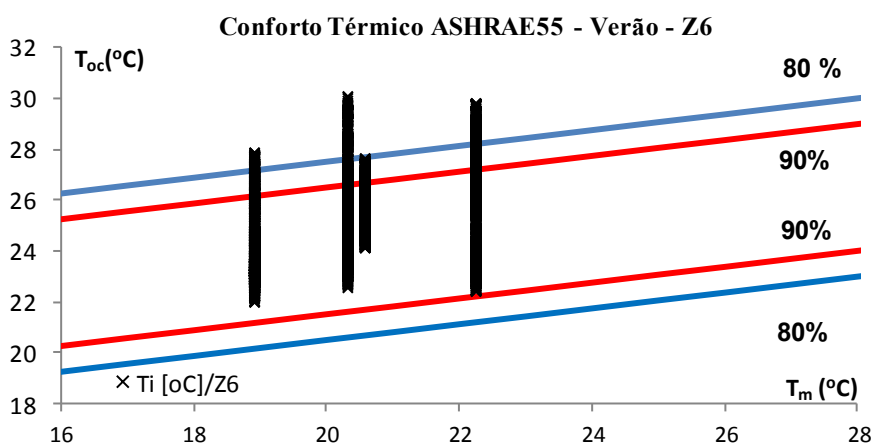


Figura 3.39 – Conforto térmico à luz da ASHRAE 55 em Z6, na estação de arrefecimento

No Quadro 3.15 regista-se o número de horas de desconforto para a estação de arrefecimento nos compartimentos Z1, Z3 e Z6, para os limites de 80 % e 90 % de aceitabilidade que constam da

ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) e respetivas percentagens face ao número total de horas da estação de arrefecimento. A percentagem de desconforto para um limite de aceitabilidade de 80 % é de 5.6 % para o compartimento Z6 (2.9 % para o Z3 e 1.1 % para o Z1). Os valores das percentagens de desconforto são superiores aos obtidos para a EN 15251 (CEN, 2007), contudo ainda assim bastante baixos de modo a comprometer o conforto em regime térmico de verão.

Quadro 3.15 - Conforto térmico à luz da ASHRAE 55, para Z1, Z3 e Z6, na estação de arrefecimento

Est.Arref.(M/h)	Cenário	Compart.	Desconforto (h) 80% aceitabilidade	Desconforto (h) 90% aceitabilidade	% 80%	% 90%
4.0 m /2928h	Experimental	Z1(Q-NE)	33.7	157.8	1.1	5.4
		Z3 (S-NE)	84.8	247.8	2.9	8.5
		Z6(Q-SW)	164.3	427.3	5.6	14.6

3.4.4. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR

3.4.4.1. INTRODUÇÃO

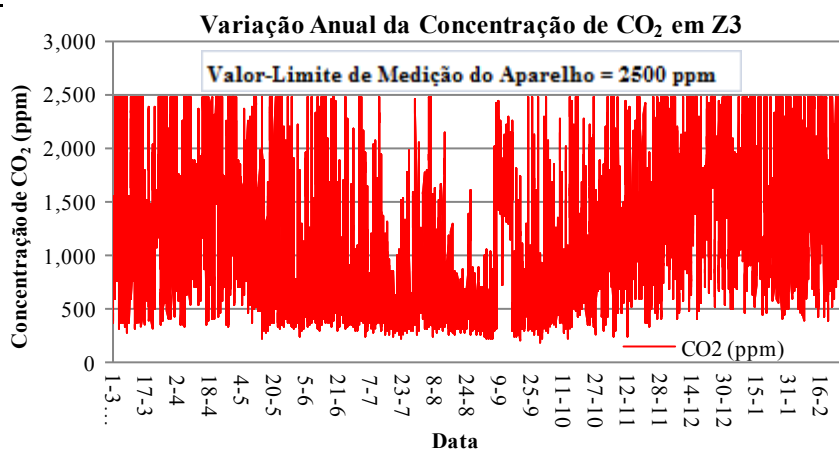
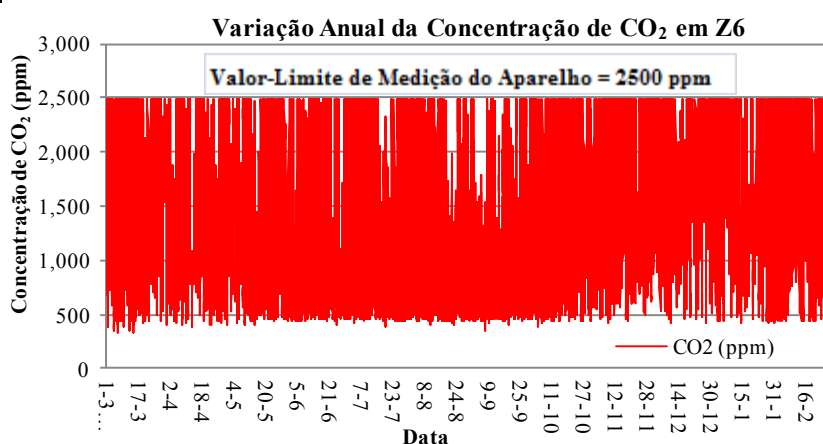
Foi efetuado o registo contínuo da concentração de CO₂ durante o período de monitorização (1 de março de 2012 a 28 de fevereiro de 2013), nos compartimentos Z3 (sala) e Z6 (quarto a SW) do Apartamento-Tipo, como medida de avaliação da Qualidade do Ar Interior (QAI)

Em espaços com ocupação sedentária, nos quais a fonte poluente é exclusivamente o metabolismo humano, foi constatada uma correlação entre a concentração de CO₂ do espaço e o seu índice de aceitabilidade em termos de odor dos bioefluentes humanos (Viegas, 2000; Pinto, 2000). A concentração de CO₂ não deve exceder 660 ppm acima da concentração do ar exterior (370 ppm), para que 80 % das pessoas recém-chegadas ao espaço considerem aceitável o nível dos odores corporais humanos. O valor sobe para 1190 ppm para uma aceitabilidade de 70 % (Olesen, 2004; Pinto, 2006).

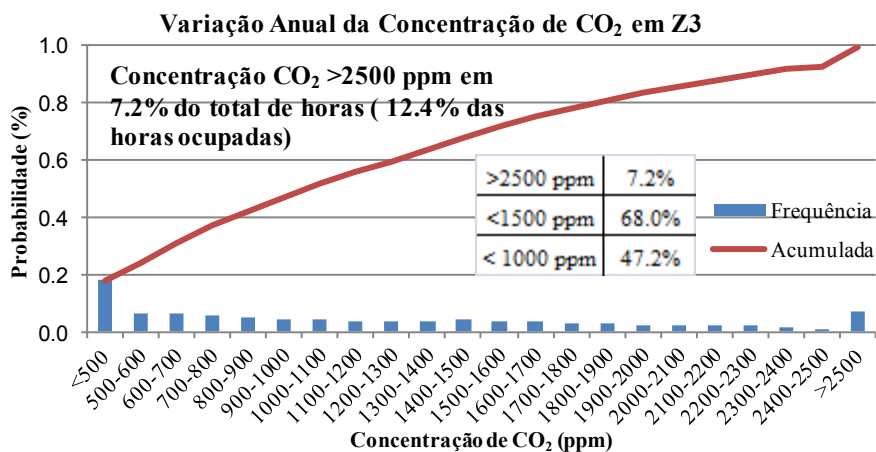
Na legislação portuguesa o valor de referência definido pelo RSECE (RSECE, 2006) para a concentração máxima de CO₂ em edifícios existentes é de 1800 mg/m³, valor correspondente a aproximadamente 1000 ppm.

3.4.4.2. CONCENTRAÇÃO DE CO₂

A figura 3.40 e 3.41 apresenta o registo de concentração de CO₂ nos compartimentos Z3 (sala a NE) e Z6 (quarto a SW) ao longo do período de medição (1/3/2012 a 28/2/2013). Os valores registados revelam-se bastante elevados atingindo níveis superiores ao limite de medição do equipamento (2500 ppm).

Figura 3.40 – Variação anual da concentração de CO₂ em Z3 (1/3/12 a 28/2/13)Figura 3.41 – Variação anual da concentração de CO₂ em Z6 (1/3/12 a 28/2/13)

As Figuras 3.42 e 3.43 representam uma análise probabilística dos resultados, por intervalos de concentração, incluindo os respetivos valores acumulados. Nas figuras apresentam-se os valores percentuais de tempo em que a concentração de CO₂ foi inferior ao valor máximo regulamentar de 1000 ppm, ao valor de referência de próximo dos 1500 ppm que determina uma aceitabilidade de 70 % (Pinto, 2006) e superior ao limite de aquisição do equipamento, os 2500 ppm.

Figura 3.42 – Variação anual da concentração de CO₂ em Z3 (1/3/12 a 28/2/13)

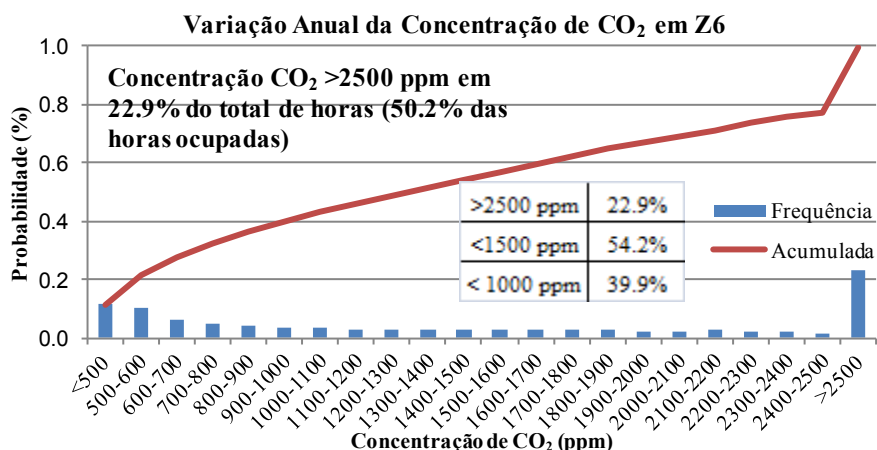


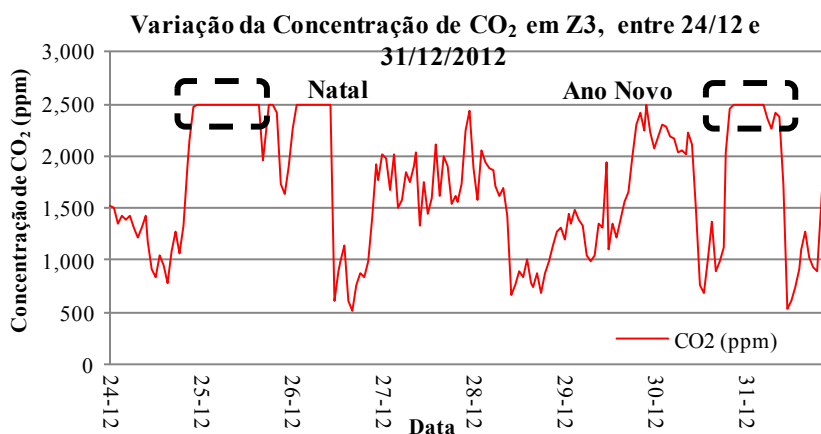
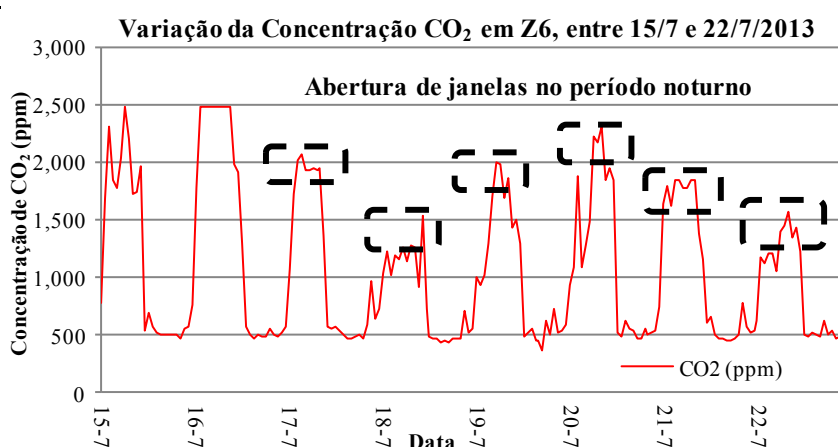
Figura 3.43 – Variação anual da concentração de CO₂ em Z6 (1/3/12 a 28/2/13)

Os valores das concentrações de CO₂ indicados nas Figuras 3.43 e 3.44 referem-se ao período total de medição (24 horas diárias ao longo de 1 ano). Contudo, se os resultados reportarem ao período de ocupação, as concentrações de CO₂ atingem valores substancialmente diferentes, conforme assinalado no Quadro 3.16. Da análise dos valores é possível constatar que para o compartimento Z6 (Quarto a SW) os valores da concentração de CO₂ são anormalmente elevados, atingindo em 50.2% do período de ocupação um valor superior a 2500 ppm. A existência de concentrações tão elevadas permite-nos concluir que a ventilação do quarto monitorizado não é eficiente. Importa, no entanto, registar que o quarto é ocupado por um casal idoso com hábitos diminutos de abertura de janelas.

Quadro 3.16 - Concentrações de CO₂ (período de ocupação versus período de medição)

Período (M/h)	Cenário	Compart.	CO ₂ (>2500ppm)		CO ₂ (<1500ppm)		CO ₂ (<1000ppm)	
			Ocup.	Total	Ocup.	Total	Ocup.	Total
12 m / 8760h	Experimental	Z3 (S-NE)	12.4	7.2	47.7	68.0	24.9	47.2
		Z6(Q-SW)	50.2	22.9	13.4	54.2	3.7	39.9

Nos gráficos das Figuras 3.44 e 3.45, à semelhança do efetuado para a temperatura e humidade relativa do ar interior, amplia-se o traçado da concentração de CO₂ para os períodos do ano entre 24 e 31 de dezembro de 2012 (semana do Natal) e entre 15 e 22 de julho de 2012 (semana típica de verão). No compartimento Z3 (sala a NE) regista-se uma concentração de CO₂ particularmente elevada no dia de Natal e de Ano Novo, que resulta de ocupação intensa do espaço durante ambos os períodos. Em oposição, no compartimento Z6 (quarto a SW), regista-se, no período noturno referente aos dias 17, 18, 19, 20, 21 e 22 de julho, uma concentração de CO₂ inferior às registadas nos restantes períodos do ano. Tratou-se de uma semana particularmente quente, com registos de temperatura do ar exterior superiores a 30 °C, durante a qual os ocupantes abriram janelas em período noturno.

Figura 3.44 – Variação da concentração de CO₂ em Z3, entre 24 e 31/12Figura 3.45 – Variação da concentração de CO₂ em Z6, entre 15 e 22/7

3.4.5. CONCLUSÕES

A medição de parâmetros higrotérmicos em edifícios residenciais reabilitados permitiu dar corpo a um dos principais objetivos da Tese, a caracterização do desempenho em serviço deste tipo de edifícios. Para tal, foi estudado o desempenho térmico de um Apartamento-Tipo do conjunto habitacional de Lordelo, tendo como base o registo contínuo da temperatura, da humidade relativa e da concentração de CO₂ no seu interior. Os resultados obtidos permitem retirar as seguintes conclusões:

- As medições efetuadas evidenciaram que os compartimentos Z1, Z3 e Z6 garantem, durante a estação de aquecimento, valores da temperatura média do ar interior próximos do valor de referência regulamentar de 20 °C (RCCTE, 2006). **Os valores médios variam entre 18.80 °C (Z1) e 19.77 °C (Z3). Os valores da temperatura média durante a estação de arrefecimento variam entre 24.41 °C (Z1) e 25.27 °C (Z6),** próximos da referência regulamentar de 25 °C (RCCTE, 2006);
- O estudo de frequências acumuladas de temperatura para os 3 compartimentos (Z1, Z3 e Z6) permite constatar, **para o compartimento Z6, que em 38.6% (42.5 % para Z1 e 24.2 % para Z3) do total de horas da estação de aquecimento não se atinge a temperatura correspondente ao limite de conforto de 18 °C,** especificado para edifícios de Categoria III da EN 15251 (CEN, 2007). Salienta-se que não se encontram instalados sistemas de aquecimento do ar ambiente. **Para o verão constata-se que em 87.8 % do total de horas da estação de**

arrefecimento, não é ultrapassada a temperatura correspondente ao limite de conforto de 27 °C para a Categoria III (95.7 % para Z1 e 93.1 % para Z3). Os valores obtidos no Apartamento-Tipo afiguram-se adequados para o verão;

- Os valores de medição da humidade relativa do ar interior para os 3 compartimentos revelaram uma gama de variação entre 20 % e 90 %, para a estação de aquecimento, e entre 35 % e 75 % para a estação de arrefecimento. O estudo de frequências acumuladas de humidade relativa revelou valores particularmente elevados, para estação de arrefecimento, no percentil de frequência acumulada 10 (cerca de 50 % para Z1, Z3 e Z6). Em apenas 10 % do tempo referente à estação de arrefecimento, o valor da humidade relativa é inferior a 50 % (requisito regulamentar especificado pelo RCCTE);

- A aplicação de modelos adaptativos para avaliação do conforto térmico do Apartamento-Tipo conduz a resultados diferenciados para a estação de aquecimento e de arrefecimento. **A percentagem de horas de desconforto, para a estação de aquecimento, varia entre 24.2 % (Z3) e 42.8 % (Z1) para o modelo adaptativo da EN 15251 (Categoria III), e entre 20.6 % (Z3) e 44.7 % (Z1) para o modelo adaptativo da ASHRAE 55 (80 % de aceitabilidade).** Para a estação de arrefecimento esse valor é praticamente nulo para o modelo da EN ISO 15251 (Categoria III), e atinge valores que variam entre 1.1 % (Z1) e 5.6 % (Z6) para o modelo da ASHRAE 55 (80 % de aceitabilidade). A aplicação de modelos adaptativos conduz, neste cenário, a uma situação de absoluto conforto térmico para estação de arrefecimento e a uma situação com cerca de 1/5 a 2/5 de percentagem de horas de desconforto, para a estação de aquecimento;

- **A existência de uma cobertura bem isolada e de envidraçados com um elevado desempenho térmico e proteção solar adequada permite, num clima temperado como o da cidade do Porto, garantir o conforto térmico para a totalidade da estação de arrefecimento e para uma parte considerável da estação de aquecimento. Os elevados ganhos internos de ocupação, iluminação e de equipamentos do Apartamento-Tipo (Capítulo 4.5.6.2) associado ao baixo volume de ar por ocupante (30 m³/ocupante) favorecem o desempenho térmico de inverno;**

- A Qualidade do Ar Interior (QAI) do Apartamento-Tipo foi caracterizada pelo registo contínuo da concentração de CO₂. A análise dos valores da concentração de CO₂ é distinta entre o compartimento Z3 (sala a NE) e o compartimento Z6 (quarto a SW). **Em Z6 a concentração de CO₂ ultrapassa os 2500 ppm em 50.2 % do período de ocupação, enquanto em Z3 esse valor é ultrapassado em apenas 12.4 % desse período.** Se considerarmos um valor de referência para a concentração máxima de CO₂ no “Apartamento-Tipo” igual a 1500 ppm (Viegas, 2000), esse valor não é ultrapassado em 47.7 % do período de ocupação de Z3 e em apenas 13.4 % do período de ocupação de Z6. Os valores registados são consideravelmente elevados, com particular ênfase para Z6. Trata-se de um quarto de casal ocupado por idosos, deficientemente ventilado, com abertura muito esporádica das janelas;

- O registo da concentração de CO₂ vem revelar que o sistema de ventilação mecânica coletiva associado a relógios programadores, que supostamente extrairiam em regime contínuo, um caudal variável, por cozinha, entre 125 e 400 m³/h, não se encontra a funcionar convenientemente, de acordo com o definido no projeto original (de Freitas, 2009). A admissão de ar novo nos quartos e na sala do Apartamento-Tipo, com aplicação de grelhas autorreguláveis nas caixas de estores, não garante, por si só, uma adequada qualidade do ar interior, na ausência de um sistema mecânico de extração de ar a funcionar conforme projetado.

3.5. VARIABILIDADE DO DESEMPENHO TÉRMICO

3.5.1. ENQUADRAMENTO

A medição contínua, em 2 períodos do ano distintos, da temperatura e da humidade relativa do ar interior de uma amostra composta por 24 apartamentos representativos do conjunto habitacional de Lordelo (de Freitas, 2009), medidos em condições de serviço, com várias tipologias, ocupação e orientação solar, permite desenvolver um estudo da variabilidade do desempenho térmico da amostra selecionada.

O estudo da variabilidade do desempenho térmico dos apartamentos instrumentados, assente no tratamento estatístico dos resultados de medição, deixa claro que o desempenho dos apartamentos é condicionado por variáveis, como: o período de medição, a localização em prumada, o fator de forma e a ocupação. A análise da influência de cada uma das 4 variáveis no desempenho térmico dos apartamentos foi devidamente avaliada, no verão e no inverno, para um conjunto de cenários de medição (Curado, *et al.*, 2013).

Da amostra instrumentada foi selecionado 1 apartamento, designado por Apartamento-Tipo, monitorizado por 1 ano, com a instalação de dispositivos de medição da temperatura e da humidade relativa do ar interior nos 6 compartimentos da habitação, e de concentração de CO₂ em 2 desses compartimentos.

Os restantes 23 apartamentos foram monitorizados no período de inverno (dezembro, janeiro e fevereiro) e no período de verão (julho, agosto e setembro). Foram medidos a temperatura e a humidade relativa do ar interior de quartos e salas, de acordo com a seguinte metodologia:

- 3 dos apartamentos da amostra foram instrumentados, em contínuo, ao longo de 3 meses no verão e de 3 meses no inverno. Os 3 apartamentos instrumentados estão implantados na mesma prumada, têm orientação, tipologia e ocupação idênticos;
- Os restantes 20 apartamentos da amostra foram instrumentados em períodos de 2 ou de 3 semanas, no verão e no inverno. Os apartamentos têm localização distinta, orientação, tipologia e ocupação diversos.

Os resultados de medição assim obtidos permitiram estabelecer o seguinte estudo de variabilidade:

- Estudo da influência do período de medição de um apartamento no desempenho térmico. Para tal procedeu-se à comparação dos resultados obtidos entre a medição de um apartamento ao longo de um período completo de 3 meses, e a sua medição em 4 períodos consecutivos de 3 semanas (Capítulo 3.5.2);
- Estudo da influência da localização em prumada dos apartamentos no seu desempenho térmico. Para tal procedeu-se à análise dos resultados de medição dos 3 apartamentos dispostos no mesmo alinhamento vertical, ao longo de um período de 3 meses, no verão e no inverno (Capítulo 3.5.3);
- Estudo da influência do fator de forma dos apartamentos no seu desempenho térmico. Para tal procedeu-se à análise dos resultados de medição de 3 apartamentos dispostos no mesmo alinhamento horizontal, ao longo de períodos distintos de 2 semanas, no verão e no inverno (Capítulo 3.5.4);
- Estudo da influência da ocupação dos apartamentos no seu desempenho térmico. Para tal procedeu-se à análise dos resultados de medição de 6 apartamentos com ocupação diversa, ao longo de períodos distintos de 2 semanas, no verão e no inverno (Capítulo 3.5.5).

O Quadro 3.17 sintetiza a metodologia adotada no estudo de variabilidade desenvolvido:

Quadro 3.17 - Metodologia adotada no estudo de variabilidade

Variabilidade	Período	N.º Apart.	Edifício/Entrada/Habitação (designação)
Período de Medição	3 meses versus 4 períodos de 3 semanas (verão e inverno)	1	14/88/42 (COB)
Localização em Prumada	3 meses (verão e inverno)	3	14/88/42 (COB), 14/88/32 (INT) e 14/88/12 (RC)
Fator de Forma	2 semanas (verão e inverno)	3	12/56/41 (Empena NW), 14/174/42 (Empena SE) e 14/56/22 ("Centro")
Ocupação	2 semanas (verão e inverno)	6	14/56/42 (A), 14/88/42 (B), 14/174/42 (C), 15/114/42 (D), 14/140/41 (E) e 12/46/41 (F)

3.5.2. INFLUÊNCIA DO PERÍODO DE MEDIÇÃO

Para estudar a influência do período de medição na variação da temperatura do ar interior, selecionou-se 1 dos 3 apartamentos medidos por um período de 3 meses, no verão e no inverno, e procedeu-se à comparação dos resultados obtidos no período analisado (3 meses), com os resultados correspondentes a 4 períodos consecutivos de 3 semanas (perfazem 3 meses de medição). O objetivo deste estudo foi, numa primeira fase, avaliar se os resultados correspondentes aos períodos reduzidos de medição, são representativos do período de medição alargado, e numa segunda fase, com recurso a uma análise de frequências acumuladas de temperatura, conseguir converter os resultados obtidos num período de medição, em resultados num outro período de medição distinto (Curado, *et al.*, 2013).

O estudo foi desenvolvido para os 3 compartimentos instrumentados: Z1 (quarto a NE), Z3 (sala a NE) e Z6 (quarto a SW), do apartamento de cobertura (Figura 3.46). Para efeito de apresentação de resultados optou-se por selecionar um dos compartimentos estudados (Z6), reduzindo-se desta forma o número de gráficos apresentados, sem contudo prejudicar o estudo desenvolvido.



Figura 3.46 – Apartamento selecionado para avaliação da influência do período de medição na temperatura do ar

O gráfico da Figura 3.47 representa a curva de frequências acumuladas da parcela $T_i - T_e$ (diferença de temperatura entre o ar interior, T_i e o ar exterior, T_e), no compartimento Z6, para o inverno. O traçado é estabelecido para os 5 períodos de medição considerados (3 meses versus 4 períodos de 3 semanas). O Quadro 3.18 apresenta os resultados correspondentes aos percentis de frequência acumulada (0, 10, 50, 90 e 100) de $T_i - T_e$, dos 5 períodos de medição considerados. O percentil 50 (mediana) regista uma diferença de 2 °C entre o Período 1 (1/12 a 21/12/2013), período mais quente ($T_{med.e} = 11.39^\circ\text{C}$), e o Período 4 (9/2 a 28/2/2013), período mais frio ($T_{med.e} = 9.65^\circ\text{C}$). Para os restantes percentis a diferença entre os períodos extremos (Períodos 1 e 4) não ultrapassa 1.1 °C. O período alargado de 3 meses de medição apresenta, para os percentis 10, 50 e 90, valores de $T_i - T_e$, próximos da média dos 4 períodos de medição reduzida.

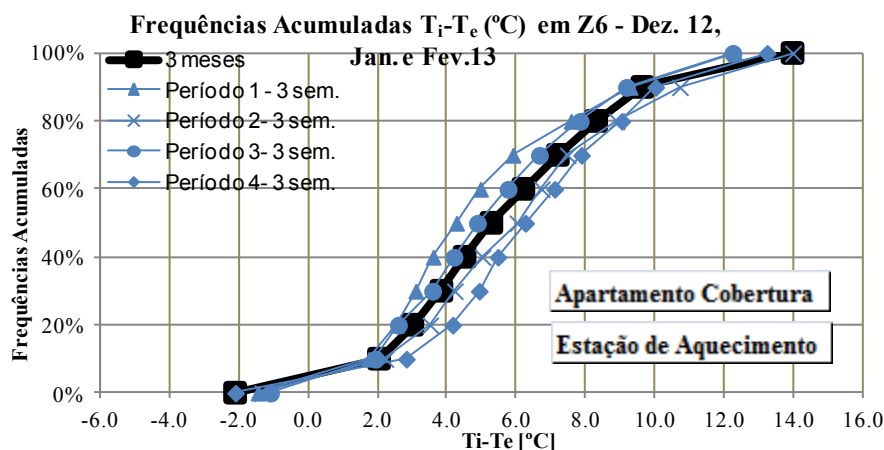
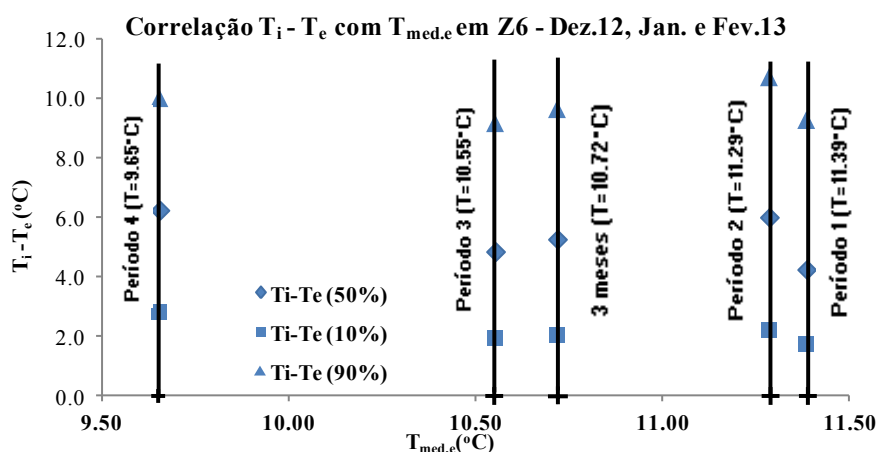


Figura 3.47 – Influência do período de medição na variação da temperatura do ar (inverno)

Quadro 3.18 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para os 5 períodos de medição – inverno

Percentis	3 Meses (1/12 a 28/2)	Período 1 (1/12 a 21/12)	Período 2 (22/12 a 11/1)	Período 3 (12/1 a 8/2)	Período 4 (9/2 a 28/2)
100	14.0	12.3	14.0	12.3	13.2
90	9.7	9.3	10.7	9.2	10.0
50	5.3	4.3	6.0	4.9	6.3
10	2.0	1.7	2.2	1.9	2.8
0	- 2.1	-1.5	-1.3	-1.1	- 2.1

Para avaliar se o resultado correspondente a um período reduzido de medição é representativo do correspondente ao período de medição alargado, foi estabelecida a correlação dos resultados dos percentis 10, 50 e 90 do parâmetro $T_i - T_e$ com a temperatura média do ar exterior, $T_{med,e}$, para cada período de medição (Figura 3.48). A leitura do gráfico da Figura 3.48 evidencia uma correlação linear entre os 5 pontos de cada percentil representado. O traçado da reta que aproxima os pontos é aproximadamente paralelo ao eixo das abcissas, o que denota uma boa correlação entre os pontos correspondentes aos vários períodos de medição. O período mais representativo dos 3 meses de medição de inverno é o Período 3, com uma diferença de temperatura relativamente ao período de medição alargado inferior a 0.5 °C (percentis 10, 50 e 90). Os períodos extremos de medição (Período 1 e Período 4) são os que mais se afastam do período alargado de 3 meses.

Figura 3.48 – Correlação entre $T_i - T_e$ e a $T_{med,e}$ para os 5 períodos de medição (inverno)

O gráfico da Figura 3.49 representa a curva de frequências acumuladas da parcela $T_i - T_e$, no compartimento Z6, no verão, para os 5 períodos de medição considerados (3 meses versus 4 períodos de 3 semanas). O Quadro 3.19 apresenta os resultados correspondentes aos percentis de frequência acumulada (0, 10, 50, 90 e 100) de $T_i - T_e$, para os 5 períodos de medição considerados. Da observação do gráfico da Figura 3.49 constata-se que existe, para os períodos de medição de verão, uma menor dispersão de resultados do que a registada para os períodos de medição de inverno (Figura 3.47). Esta constatação é evidente no valor dos percentis 10, 50 e 90, que apresentam uma diferença máxima de 1 °C entre o Período 3 (12/8 a 8/9/2013), período mais quente ($T_{med.e} = 21.40$ °C) e o Período 1 (1/7 a 21/7/2013), período mais frio ($T_{med.e} = 19.56$ °C). À semelhança do inverno, o período alargado de 3 meses de medição apresenta, para os percentis 10, 50 e 90, valores de $T_i - T_e$, próximos da média dos 4 períodos de medição reduzida.

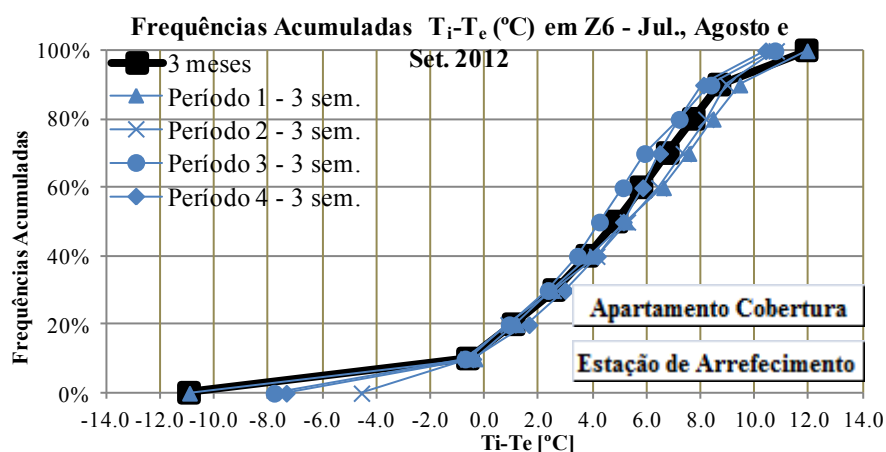


Figura 3.49 – Influência do período de medição na variação da temperatura do ar (verão)

Quadro 3.19 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para os 5 períodos de medição – verão

Percentis	3 Meses (1/7 a 30/9)	Período 1 (1/7 a 21/7)	Período 2 (22/7 a 11/8)	Período 3 (12/8 a 8/9)	Período 4 (9/9 a 30/9)
100	11,9	11,9	10,8	10,7	10,4
90	8,7	9,4	9,0	8,4	8,1
50	4,9	5,2	5,3	4,2	5,1
10	-0,6	-0,4	-0,6	-0,7	-0,4
0	-10,9	-10,9	-4,6	-7,8	-7,3

Tal como foi efetuado para as medições de inverno, para se poder avaliar se o resultado de um período reduzido de medição de verão é representativo do de um período de medição alargado, foi estabelecida a correlação dos resultados dos percentis 10, 50 e 90 do parâmetro $T_i - T_e$ com a temperatura média do ar exterior, $T_{med.e}$, para cada período de medição (Figura 3.50). Se excluirmos o Período 3 (período mais quente), o gráfico da Figura 3.50 evidencia uma boa correlação entre os pontos correspondentes aos vários períodos de medição, com os pontos aproximados por uma reta com traçado aproximadamente paralelo ao eixo das abcissas. O período mais representativo dos 3 meses de medição de verão é o Período 4, com uma diferença de temperatura relativamente ao período de medição alargado inferior a 0.6 °C (percentis 10, 50 e 90). Os períodos extremos de medição (Período 1 e Período 3) são os mais afastados do período alargado de 3 meses.

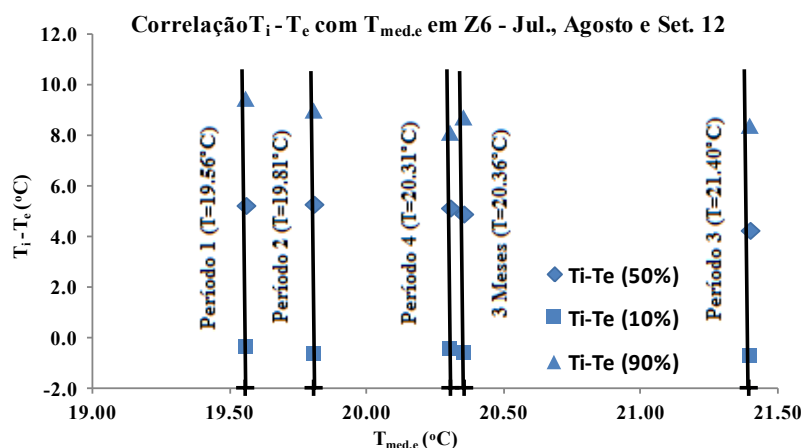


Figura 3.50 – Correlação entre $T_i - T_e$ e a $T_{med,e}$ para os 5 períodos de medição (verão)

3.5.3. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO EM PRUMADA

Para estudar a influência da localização dos apartamentos em prumada na variação da temperatura do ar interior, selecionou-se 3 apartamentos medidos por um período de 3 meses, no verão e no inverno, e procedeu-se à comparação dos resultados de medição da temperatura do ar interior. Os apartamentos estão localizados em prumada, têm idêntica tipologia, orientação solar e ocupação (Figura 3.51). O estudo desenvolvido pretendeu avaliar a variabilidade da temperatura do ar interior, num período alargado de medição, em apartamentos dispostos ao longo de um alinhamento vertical.

À semelhança da análise efetuada no Capítulo 3.5.2 o estudo foi desenvolvido para os 3 compartimentos instrumentados: Z1 (quarto a NE), Z3 (sala a NE) e Z6 (quarto a SW) de cada 1 dos 3 apartamentos instrumentados (Figura 3.51). Para efeito de apresentação de resultados optou-se por seleccionar um dos compartimentos estudados (Z6).



Figura 3.51 – Apartamentos para avaliação da influência da localização em prumada na temperatura do ar

O gráfico da Figura 3.52 representa a curva de frequências acumuladas da temperatura do ar interior, T_i , no compartimento Z6, para um período de 3 meses de medição no inverno. O Quadro 3.20 apresenta os resultados correspondentes aos percentis de frequência acumulada 0, 10, 50, 90 e 100, de T_i para os 3 apartamentos localizados em prumada, designados por apartamento de cobertura (COB), intermédio (INT) e térreo (RC). O percentil 50 (mediana) da temperatura do ar interior, T_i , regista para os 3 apartamentos, uma diferença de apenas 0.4 °C. Essa diferença é um pouco mais acentuada nos percentis 0 e 100, contudo não excede 1.3 °C (diferença extrema para o percentil 0).

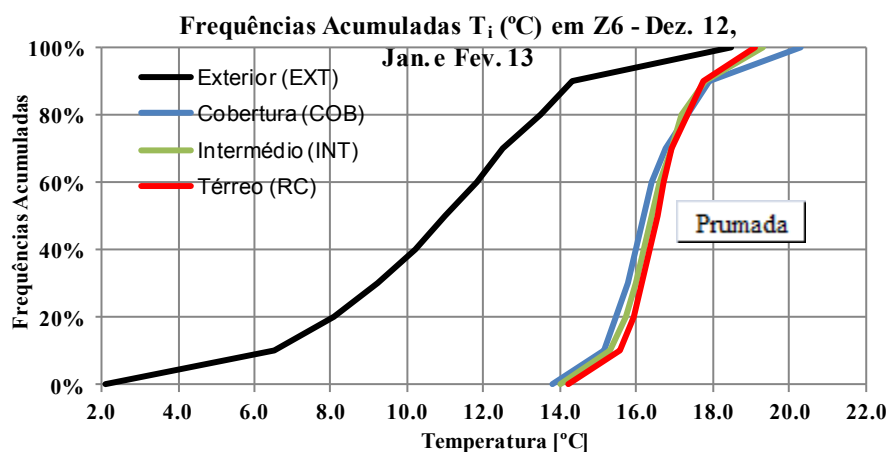


Figura 3.52 – Influência da localização em prumada na variação da temperatura do ar (inverno)

Quadro 3.20 - Frequências acumuladas de T_i , em Z6, para os 3 apartamentos em prumada – inverno

Percentis	T_e (°C)	T_i (°C) - COB	T_i (°C) - INT	T_i (°C) - RC
100	18.5	19.3	18.7	18.7
90	14.3	17.5	17.3	17.2
50	11.0	15.5	15.6	15.9
10	6.5	14.2	14.4	14.9
0	2.1	13.4	12.7	14.0

O gráfico da Figura 3.53 ilustra o estudo do conforto térmico, no compartimento Z6, para os apartamentos COB, INT e RC, ao longo dos 3 meses de medição de inverno. Cada ponto no gráfico corresponde a um dos resultados de medição, espaçados entre si de 10 minutos, obtidos no período entre 1 de dezembro de 2012 e 28 de fevereiro de 2013.

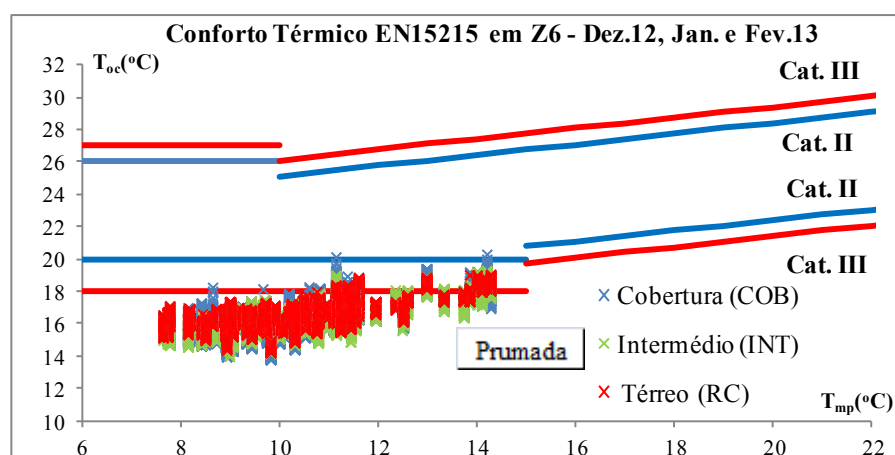


Figura 3.53 – Influência da localização em prumada no conforto térmico, em Z6, no inverno

No Quadro 3.21 regista-se o número de horas de desconforto nos meses de Dez. 2012, Jan. e Fev. 2013, no compartimento Z6, para as Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007) e respetivas percentagens face ao número total de horas do período de medição. A variabilidade do conforto térmico entre os 3 apartamentos localizados em prumada é muito reduzida, com uma diferença de apenas 1.1 % no intervalo de tempo em que se regista um cenário de desconforto (91.7 % para COB e 92.8 % para INT).

Quadro 3.21 - Conforto térmico à luz da EN 15251, em Z6, para os 3 apartamentos em prumada - inverno

Meses	Compartimento	Apartamento	Desconforto (h) Cat. III	Desconforto (h) Cat. II	% Cat. III	% Cat. II
Dez. 12., Jan. e Fev. 13	Z6(Q-SW)	COB	1980.2	2159.5	91.7	99.9
		INT	2005.2	2160	92.8	100
		RC	1995.7	2160	92.4	100

O gráfico da Figura 3.54 representa a curva de frequências acumuladas da temperatura do ar interior, T_i , no compartimento Z6, para um período de 3 meses de medição no verão. O Quadro 3.22 apresenta os resultados correspondentes aos percentis de frequência acumulada 0, 10, 50, 90 e 100, de T_i para os 3 apartamentos localizados em prumada. Da observação do gráfico da Figura 3.54 constata-se que existe, para o período de medição de verão, uma maior variabilidade de T_i do que para o período de inverno. O percentil 50 (mediana) da temperatura do ar interior T_i regista para os 3 apartamentos, uma diferença de 1.6 °C (0.4 °C para o inverno). Essa diferença é em regra mantida para os restantes percentis de análise de resultados.

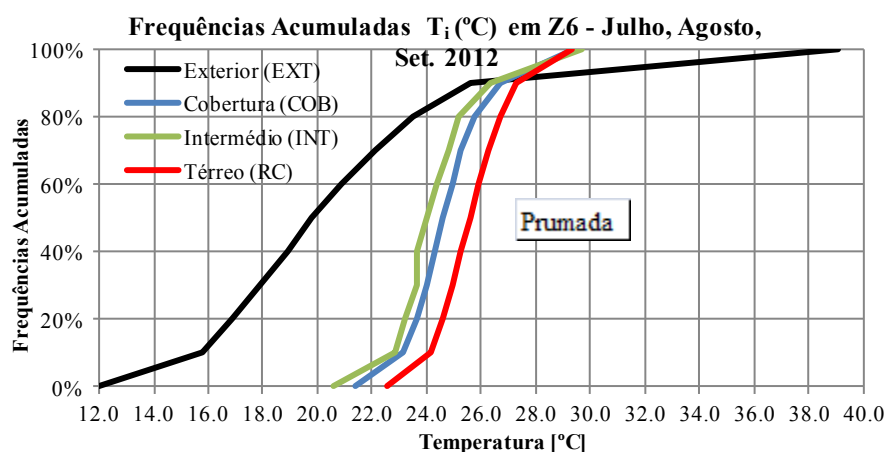


Figura 3.54 – Influência da localização em prumada na variação da temperatura do ar (verão)

Quadro 3.22 - Frequências acumuladas de T_i , em Z6, para os 3 apartamentos em prumada – verão

Percentis	T_e (°C)	T_i (°C) - COB	T_i (°C) - INT	T_i (°C) - RC
100	39.1	29.4	29.7	29.3
90	25.6	26.7	26.3	27.3
50	19.8	24.6	24.0	25.6
10	15.8	23.1	22.9	24.2
0	12.0	21.4	20.6	22.5

O gráfico da Figura 3.55 ilustra o estudo do conforto térmico, no compartimento Z6, para os apartamentos COB, INT e RC, ao longo dos 3 meses de medição de verão. Cada ponto no gráfico corresponde a um dos resultados de medição, espaçados entre si de 10 minutos, obtidos no período entre 1 de junho e 30 de setembro de 2012.

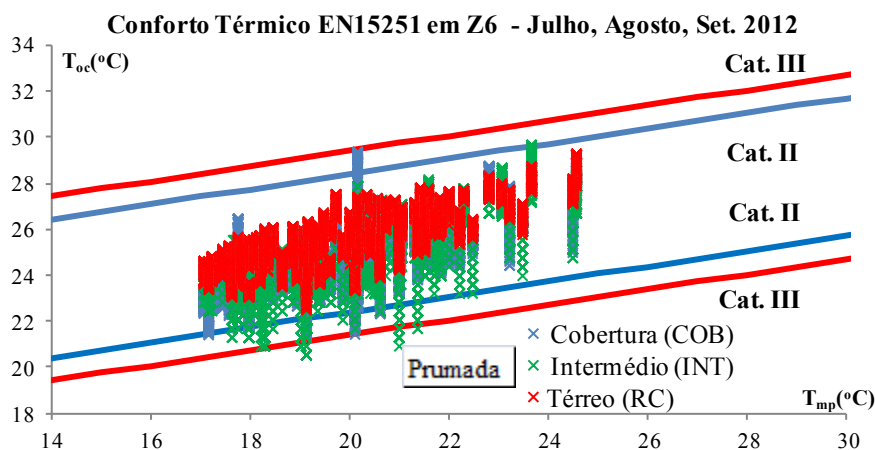


Figura 3.55 – Influência da localização em prumada no conforto térmico, em Z6, no verão

No Quadro 3.23 regista-se o número de horas de desconforto nos meses de julho, agosto e setembro de 2012, no compartimento Z6, para as Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007) e respetivas percentagens face ao número total de horas do período de medição. A variabilidade do conforto térmico entre os 3 apartamentos localizados em prumada, no verão, é muito reduzida, não se evidenciando cenários de desconforto.

Quadro 3.23 - Conforto térmico à luz da EN 15251, em Z6, para os 3 apartamentos em prumada - verão

Meses	Compartimento	Apartamento	Desconforto (h) Cat.III	Desconforto (h) Cat.II	% Cat.III	% Cat.II
Jul., Agosto, Set.2013	Z6(Q-SW)	COB	0.0	7.7	0.0	0.0
		INT	0.0	0.8	0.0	0.0
		RC	0.0	0.0	0.0	0.0

3.5.4. INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA DOS APARTAMENTOS

Para estudar a influência do fator de forma dos apartamentos (relação entre as áreas da envolvente exterior e interior com requisitos térmicos e o volume) na variação da temperatura do ar interior, selecionou-se 3 apartamentos dispostos no mesmo alinhamento horizontal, medidos em períodos reduzidos de 2 semanas, no verão e no inverno, e procedeu-se à comparação dos resultados de medição da temperatura do ar interior. Os apartamentos estão localizados no último piso dos edifícios 12 e 14, em zona corrente (apartamento designado por Centro) e em duas empenas opostas (apartamentos designados por Empena NW e Empena SE), de acordo com o representado nas Figuras 3.56 e 3.57. O estudo desenvolvido pretendeu avaliar a variabilidade do parâmetro $T_i - T_e$, num período reduzido de medição (2 semanas), com o fator de forma de 3 apartamentos dispostos ao longo de um mesmo alinhamento horizontal.

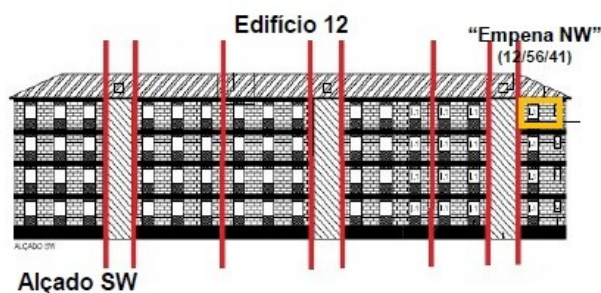


Figura 3.56 – Localização do apartamento designado por Empena NW no Edifício 12

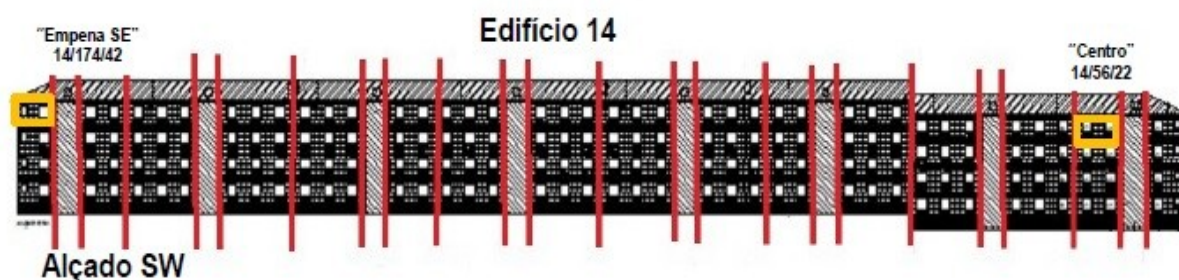


Figura 3.57 – Localização dos apartamentos designados por Empena SE e Centro no Edifício 14

Os apartamentos designados por Centro e Empena SE foram medidos, no inverno, no período de medição designado por Período 3 (12/1 a 8/2/2013 com $T_{med,e}=10.55^{\circ}\text{C}$), e o apartamento designado por Empena NW, foi medido no Período 4 (9 a 28/2/2013 com $T_{med,e}=9.65^{\circ}\text{C}$). Para obter valores de $T_i - T_e$ comparáveis para os 3 apartamentos, é necessário converter os valores do Período 4 para valores do Período 3, bastando para tal somar aos valores correspondentes à Empena NW um fator de correção de temperatura por percentil, obtido a partir do Quadro 3.18. Os resultados obtidos constam da Figura 3.58 e do Quadro 3.24.

A análise dos resultados permite constatar uma dispersão considerável no valor do parâmetro $T_i - T_e$. Essa dispersão atinge um valor de 2.6°C para a mediana, um valor próximo de 3°C para o percentil 90 e um valor de 3.3°C para o percentil 100. O estudo dos resultados obtidos permite concluir que o efeito do fator de forma de 3 apartamentos dispostos num mesmo alinhamento horizontal, na variação da temperatura do ar interior, é um efeito digno de registo. Como seria expectável o apartamento designado por Centro, com menor fator de forma, é o mais quente no período de medição considerado.

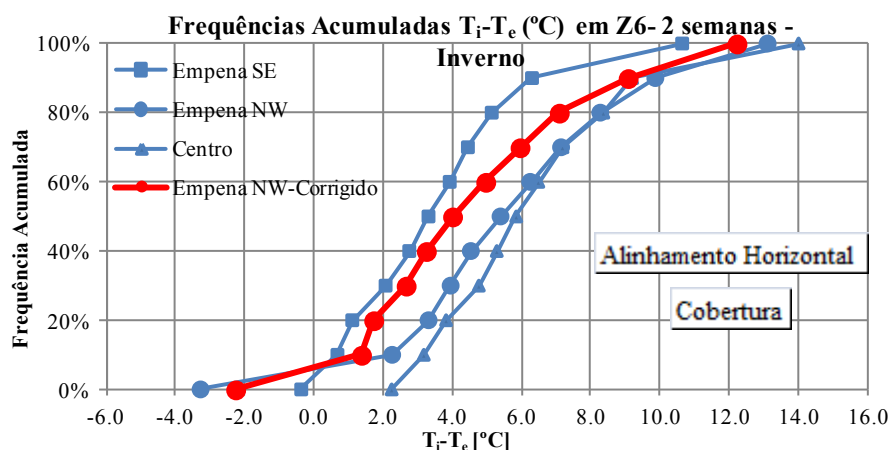


Figura 3.58 – Influência da localização do fator de forma na temperatura do ar (inverno)

Quadro 3.24 - Freqüências acumuladas de $T_i - T_e$ para 3 apartamentos num alinhamento horizontal – inverno

Percentis	$T_i - T_e$ ($^{\circ}\text{C}$) Empena SE	$T_i - T_e$ ($^{\circ}\text{C}$) Empena NW	$T_i - T_e$ ($^{\circ}\text{C}$) Empena NW Corrigido	$T_i - T_e$ ($^{\circ}\text{C}$) Centro
100	10.7	13.1	12.2	14.0
90	6.3	9.9	9.1	9.2
50	3.3	5.4	4.0	5.9
10	0.7	2.3	1.4	3.2
0	-0.4	-3.3	-2.3	2.3

O cenário de verão é similar ao de inverno. Os 3 apartamentos foram medidos em períodos distintos: enquanto os apartamentos Centro e Empena SE foram medidos no Período 3 (4/8 a 16/8/2012 com $T_{med,e}=21.40$ °C), o apartamento Empena NW foi medido durante o Período 4 (9 a 30/9/2012 com $T_{med,e}=20.31$ °C). Para obter valores de $T_i - T_e$ comparáveis é necessário converter os valores do Período 4 em valores do Período 3, somando aos valores correspondentes à Empena NW um fator de correção de temperatura, por percentil, obtido a partir do Quadro 3.19. Os resultados obtidos constam da Figura 3.59 e do Quadro 3.25.

Os resultados evidenciam que a variação do parâmetro $T_i - T_e$ é notória no verão, com valores do percentil 50 a atingir uma diferença entre apartamentos de 3.0 °C. Nos restantes percentis a diferença atinge valores até 5 °C (4.1 °C para o percentil 100 e 4.8 °C para o percentil 10). O estudo dos resultados obtidos está em linha com o registado para o período de inverno. Constata-se que existe um efeito pronunciado do fator de forma dos apartamentos no mesmo alinhamento horizontal, na variação da temperatura do ar interior. O apartamento designado por Centro, localizado em zona corrente, com menor fator de forma, é o mais quente no período de medição considerado.

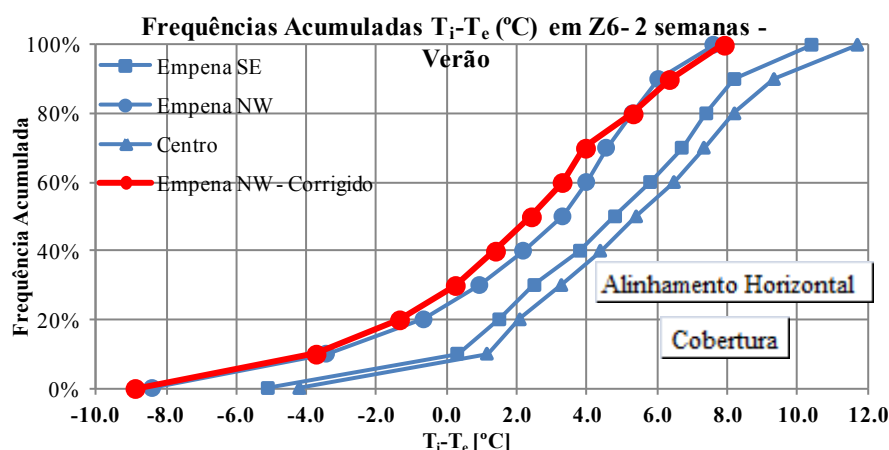


Figura 3.59 – Influência do fator de forma na temperatura do ar (verão)

Quadro 3.25 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para 3 apartamentos em alinhamento horizontal – verão

Percentis	$T_i - T_e$ (°C) Empena SE	$T_i - T_e$ (°C) Empena NW	$T_i - T_e$ (°C) Empena NW Corrigido	$T_i - T_e$ (°C) Centro
100	10.4	7.6	7.9	11.7
90	8.2	6.0	6.3	9.3
50	4.8	3.3	2.4	5.4
10	0.3	-3.4	-3.7	1.1
0	-5.1	-8.4	-8.9	-4.2

3.5.5. INFLUÊNCIA DA OCUPAÇÃO DOS APARTAMENTOS

Para estudar a influência da ocupação na variação da temperatura do ar interior, selecionaram-se 6 apartamentos medidos em períodos reduzidos de 2 semanas, no verão e no inverno e procedeu-se à comparação dos resultados de medição da temperatura do ar interior. Os apartamentos estão localizados no último piso dos edifícios (apartamentos designados por A, B, C, D, E e F). O estudo desenvolvido pretendeu avaliar a variabilidade do parâmetro $T_i - T_e$, num período reduzido de medição (2 semanas) em 6 apartamentos com ocupação distinta (Quadro 3.26).

Quadro 3.26 - Ocupação dos 6 apartamentos medidos

Apartamento	Ocupação (pessoas)
A	5
B	3
C	1
D	5
E	2
F	2

No inverno, os apartamentos A, B, C e D foram medidos no Período 3 (entre 12/1 e 8/2/2012, com $T_{med,e}=10.55$ °C), o apartamento E foi medido no Período 2 (entre 22/12/2012 e 11/1/2013 com $T_{med,e}=11.29$ °C) e o apartamento F no Período 4 (entre 9/2 e 28/2/2013 com $T_{med,e}=9.65$ °C). Para que os 6 valores possam ser devidamente comparáveis, dado que foram efetuados em períodos de medição distintos, será necessário corrigir os valores dos Períodos 2 e 4, afetando os correspondentes valores de $T_i - T_e$ dos “fatores de correção”, para cada percentil, extraídos do Quadro 3.18. Os valores devidamente corrigidos estão representados na Figura 3.60 e no Quadro 3.27.

Os resultados evidenciam uma variação acentuada do parâmetro $T_i - T_e$ para a generalidade dos percentis estudados. Os apartamentos A e C são, respetivamente, o apartamento mais quente e o menos quente no período de análise. A mediana tem para os apartamentos A e C, uma variação de 2.6 °C, o percentil 90 uma variação de 2.9 °C, e o percentil 10, uma variação de 2.5 °C. Os resultados no inverno são coerentes com nível de ocupação dos apartamentos. De acordo com o Quadro 3.26, o apartamento A é o mais ocupado da amostra (5 pessoas) e o C, o menos ocupado (1 pessoa).

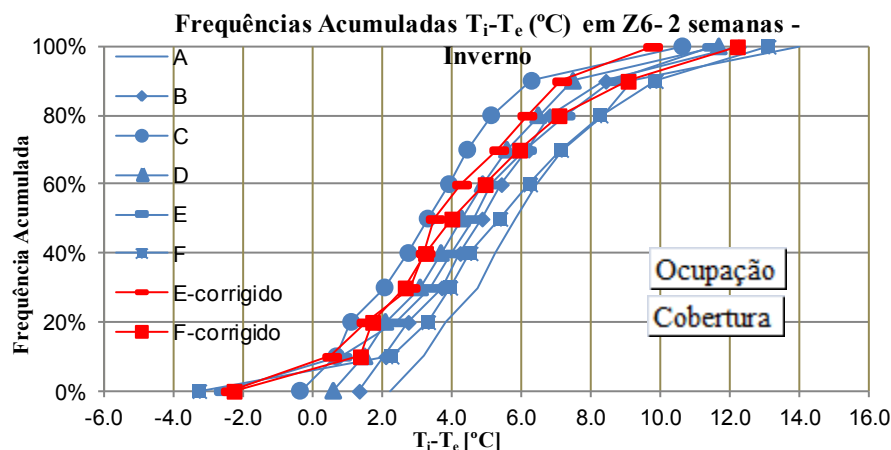


Figura 3.60 – Influência da ocupação na variação da temperatura do ar (inverno)

Quadro 3.27 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para 6 apartamentos com diferente ocupação - inverno

Percentis	A	B	C	D	E	E- corrigido	F	F - corrigido
100	14.0	12.3	10.7	11.7	11.5	9.8	13.1	12.2
90	9.2	8.4	6.3	7.5	8.7	7.2	9.9	9.1
50	5.9	4.9	3.3	4.3	4.6	3.5	5.4	4.0
10	3.2	2.1	0.7	1.5	0.8	0.5	2.3	1.4
0	2.3	1.3	-0.4	0.6	-2.6	-2.4	-3.3	-2.3

No verão os apartamentos A, B, C e D foram medidos no Período 3 (entre 12/8 e 8/9/2013 com $T_{med,e}=21.40$ °C), o apartamento E no Período 2 (entre 22/7 e 11/8 com $T_{med,e}=19.81$ °C) e o apartamento F no Período 4 (entre 9/9 e 30/9/2013 com $T_{med,e}=20.31$ °C). Tal como efetuado para o inverno foi necessário afetar os valores de $T_i - T_e$ referentes aos Períodos 2 e 4, dos “fatores de correção” retirados do Quadro 3.19. Os valores corrigidos constam da Figura 3.61 e do Quadro 3.28. Os apartamentos A e F são, respetivamente, o apartamento mais quente e o menos quente do período de análise. A mediana e o percentil 90 têm, para os apartamentos A e F, uma variação de 2.9 °C, e o percentil 10, uma variação de 4.3 °C. À semelhança dos resultados obtidos no inverno, os resultados no verão são coerentes com nível de ocupação dos apartamentos. O apartamento mais quente é o apartamento mais ocupado da amostra (apartamento A) e o apartamento menos quente é um dos menos ocupados da amostra (apartamento F).

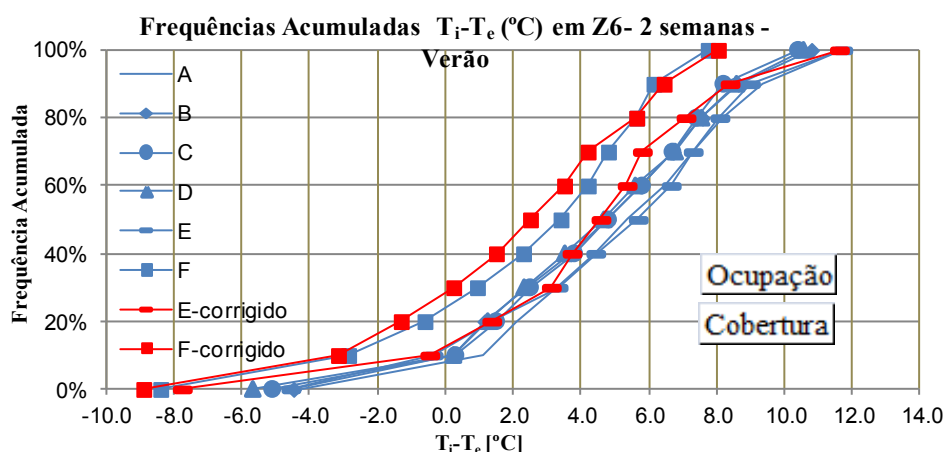


Figura 3.61 – Influência da ocupação na variação da temperatura do ar (verão)

Quadro 3.28 - Frequências acumuladas de $T_i - T_e$ para 6 apartamentos com diferente ocupação - verão

Percentis	A	B	C	D	E	E-corrigido	F	F-corrigido
100	11.7	10.8	10.4	10.6	11.7	11.6	7.7	8.0
90	9.3	8.6	8.2	8.6	9.0	8.4	6.1	6.4
50	5.4	4.8	4.8	4.7	5.7	4.6	3.4	2.5
10	1.1	0.2	0.3	0.2	-0.4	-0.5	-2.9	-3.2
0	-4.2	-4.5	-5.1	-5.7	-4.6	-7.8	-8.4	-8.9

3.5.6. SÍNTESE DE RESULTADOS

A campanha de medição desenvolvida permitiu recolher um conjunto muito alargado de resultados de medição, que facilitou o estudo da variabilidade do desempenho térmico da amostra instrumentada, em condições de serviço, nos períodos de verão e de inverno. Os resultados obtidos permitem retirar as seguintes conclusões:

- O estudo da influência do período de medição na variação da temperatura do ar interior, T_i , permitiu concluir que quando a temperatura média do ar exterior, $T_{med,e}$, num período de medição reduzido, é próximo do valor dessa temperatura no período alargado, os resultados obtidos para período mais curto são representativos dos do período mais longo. Na análise desenvolvida concluiu-se que o período mais representativo dos 3 meses de medição

de inverno é o Período 3, com uma diferença de temperatura relativamente ao período de medição alargado inferior a 0.5 °C. Os períodos extremos de medição (Período 1 e Período 4) são os que mais se afastam do período alargado de 3 meses de inverno. O período mais representativo dos 3 meses de medição de verão é o Período 4, com uma diferença de temperatura relativamente ao período de medição alargado inferior a 0.6 °C. Os períodos extremos de medição (Período 1 e Período 3) são os que mais se afastam do período alargado de 3 meses de verão;

- O estudo da influência da localização em prumada na variação da temperatura do ar interior, T_i , permitiu concluir que a diferença entre os 3 apartamentos instrumentados, para o período de medição analisado, é pouco acentuada. Para o percentil 50 (mediana) essa diferença não excede 0.4 °C, para o inverno, e 1.6 °C, para o verão. A variabilidade do conforto térmico entre os 3 apartamentos é igualmente muito reduzida, com uma diferença de apenas 1.1 % no intervalo de tempo em que se regista um cenário de desconforto para o inverno e uma diferença nula para o verão;

- O estudo da influência do fator de forma na variação da temperatura do ar interior, T_i , permitiu concluir que o efeito desta variável é bastante pronunciado, tanto no inverno como no verão. Os resultados evidenciam que a variação do parâmetro $T_i - T_e$, entre apartamentos dispostos no mesmo alinhamento horizontal, atinge para a mediana, um valor de 2.6 °C para o inverno e de 3.0 °C para o verão. O apartamento designado por Centro, com menor fator de forma, é o mais quente para o inverno e o mais quente para o verão, comportamento explicado pelos elevados ganhos internos;

- O estudo da influência da ocupação na variação da temperatura do ar interior, T_i , permitiu concluir que o efeito desta variável é pronunciado, tanto no inverno como no verão. Os resultados evidenciam uma coerência entre o nível de ocupação dos apartamentos e o valor do parâmetro $T_i - T_e$. Os apartamentos mais ocupados são os mais quentes e os menos ocupados, os menos quentes. Os apartamentos A e C são, respetivamente, o apartamento mais quente e o menos quente no período de inverno. (a mediana apresenta uma variação de 2.6 °C) e os apartamentos A e F são, respetivamente, o mais quente e o menos quente no período de verão (a mediana apresenta uma variação de 2.9 °C).

3.6. VARIABILIDADE DA PERMEABILIDADE AO AR DA ENVOLVENTE

3.6.1. RESULTADOS DO ENSAIO DA PORTA VENTILADORA

Para medição da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos foi utilizado o ensaio da porta ventiladora. As medições foram efetuadas com recurso ao modelo de porta ventiladora *Retrotec 1000*, com aplicação do método A da norma EN ISO 13829 (CEN, 2001) nos ensaios de pressurização e despressurização dos apartamentos. As medições *in situ* de uma amostra de 25 apartamentos do conjunto habitacional de Lordelo foram implementadas nos dias 20, 21, 22, 28 e 31 de maio de 2013, com uma temperatura média do ar exterior variável entre 13.5 e 21 °C e uma velocidade do vento no decurso dos ensaios variável entre 1.2 e 2.4 m/s.

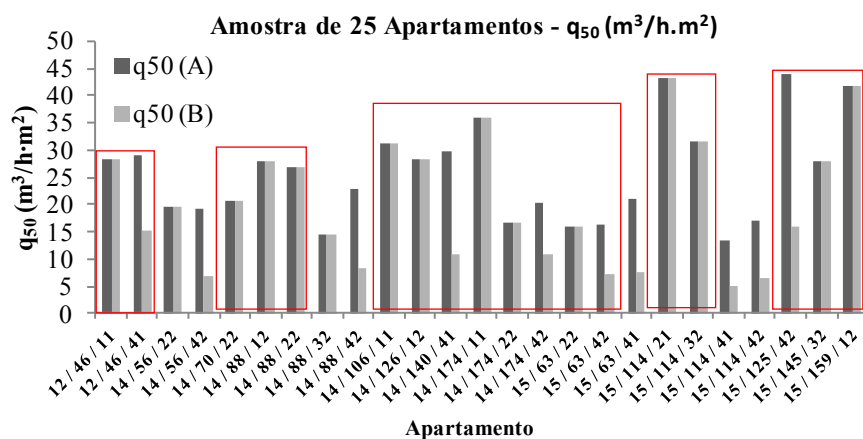
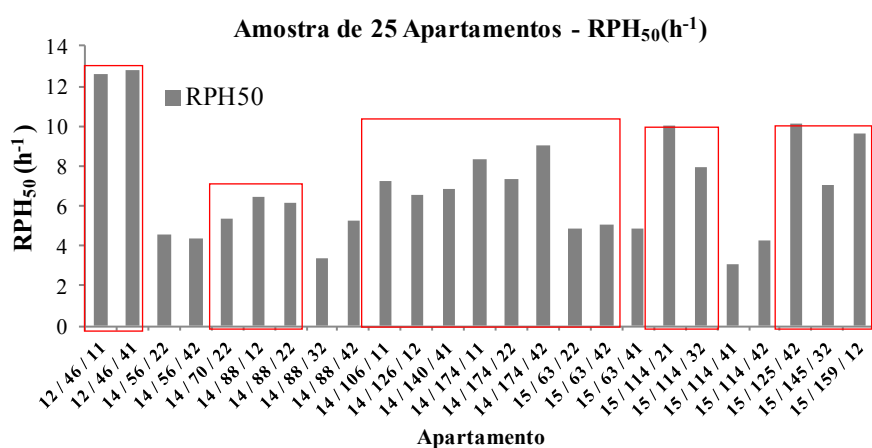
Os resultados médios dos ensaios de pressurização e despressurização dos 25 apartamentos da amostra (Ramos, *et al.*, 2013) são apresentados no Quadro 3.29 e nas Figuras 3.62 e 3.63. Os resultados são traduzidos pelos indicadores RPH_{50} (taxa de renovação horária a 50 Pa) e q_{50} (razão entre o caudal escoado a 50 Pa e a área da envolvente).

Para o cálculo do parâmetro q_{50} foram estabelecidas duas hipóteses: a hipótese A na qual se considera apenas o contributo da envolvente vertical, e a hipótese B na qual se considera, para os apartamentos de cobertura, o contributo adicional da laje de teto em betão armado. A hipótese B, descrita na norma EN ISO 13829 (CEN, 2001), não é aplicável à situação em análise dado que a laje de cobertura é em betão armado e como tal não é permeável ao ar.

No Quadro 3.29 são descritas as principais modificações executadas pelos ocupantes dos apartamentos que possam ter influenciado os resultados obtidos (Ramos, *et al.*, 2014). Os apartamentos sem introdução de modificações encontram-se identificados com uma moldura nas Figuras 3.62 e 3.63.

Quadro 3.29 - Resultados de medição do ensaio de permeabilidade ao ar dos 25 apartamentos

Apartamento (Edifício/ Entrada/ Habitação)	Tipologia	q_{50} (A) (m ³ /h·m ²)	q_{50} (B) (m ³ /h·m ²)	RPH_{50} (h ⁻¹)	Modificações introduzidas pelos ocupantes
12 / 46 / 11	T1	28.43	28.43	12.65	Sem modificações
12 / 46 / 41	T1	29.01	15.24	12.85	Sem modificações
14 / 56 / 22	T3	19.59	19.59	4.53	Abertura da lavandaria selada
14 / 56 / 42	T3	19.15	6.98	4.41	Abertura da lavandaria selada
14 / 70 / 22	T4-B	20.79	20.79	5.34	Sem modificações
14 / 88 / 12	T3	27.84	27.84	6.44	Sem modificações
14 / 88 / 22	T3	26.70	26.70	6.18	Sem modificações
14 / 88 / 32	T3	14.50	14.50	3.35	Grelhas autorreguláveis seladas e abertura da lavandaria selada
14 / 88 / 42	T3	22.85	8.32	5.26	Grelhas autorreguláveis seladas
14 / 106 / 11	T3	31.33	31.33	7.25	Sem modificações
14 / 126 / 12	T3	28.47	28.47	6.58	Sem modificações
14 / 140 / 41	T3	29.66	10.81	6.82	Sem modificações
14 / 174 / 11	T3	35.85	35.85	8.30	Sem modificações
14 / 174 / 22	T1	16.67	16.67	7.38	Sem modificações
14 / 174 / 42	T1	20.45	10.75	9.06	Sem modificações
15 / 63 / 22	T4-A	15.82	15.82	4.92	Sem modificações
15 / 63 / 42	T4-A	16.34	7.14	5.08	Sem modificações
15 / 63 / 41	T3	21.11	7.69	4.86	Grelhas autorreguláveis seladas
15 / 114 / 21	T3	43.31	43.31	10.02	Sem modificações
15 / 114 / 32	T4-B	31.68	31.68	7.96	Sem modificações
15 / 114 / 41	T3	13.37	4.87	3.08	Grelhas autorreguláveis seladas e abertura da lavandaria selada
15 / 114 / 42	T4-B	16.91	6.55	4.28	Abertura da lavandaria selada
15 / 125 / 42	T3	44.16	16.11	10.16	Sem modificações
15 / 145 / 32	T4-B	28.04	28.04	7.09	Sem modificações
15 / 159 / 12	T3	41.67	41.67	9.64	Sem modificações

Figura 3.62 – Representação gráfica dos valores de q_{50} Figura 3.63 – Representação gráfica dos valores de RPH_{50}

3.6.2. ANÁLISE DE RESULTADOS

No Quadro 3.30 é apresentado o estudo estatístico dos resultados de medição suportado pelo cálculo da média e do coeficiente de variação de Pearson, C_v ($C_v = \text{desvio padrão}/\text{média}$), dos valores de RPH_{50} e q_{50} (A).

Quadro 3.30 - Estudo estatístico dos parâmetros RPH_{50} e q_{50} (A)

Tipo de apartamento	Quantidade	q_{50} (A)		RPH_{50}	
		Média ($m^3/h \cdot m^2$)	C_v (%)	Média h^{-1}	C_v (%)
Totalidade	25	25.75	35	6.94	38
Totalidade	T1	4	23.64	26	10.48
	T3	15	27.97	35	6.46
	T4 (A e B)	6	21.60	31	5.78
Apartamentos sem modificações	T1	4	23.64	26	10.48
	T3	9	34.33	21	7.93
	T4 (A e B)	5	22.53	31	6.08
Apartamentos com modificações	T3	7	18.43	32	4.24
Todos os apartamentos sem modificações, por tipo de empreiteiro (Empreiteiro E1 ou E2)	T1 - Edifício12 (E1)	2	28.72	1	12.75
	T1 - Edifício14 (E2)	2	18.56	14	8.22
	T3 – Edifício 14 (E2)	6	29.98	11	6.93
	T3 – Edifício 15 (E1)	3	43.05	3	9.94
	T4 (A e B) - Edifício14 (E2)	1	20.79	-	5.34
	T4 (A e B) - Edifício15 (E1)	4	22.97	35	6.26

Tendo como base o estudo estatístico apresentado no Quadro 3.30 é possível estabelecer os seguintes comentários:

- O valor médio do parâmetro RPH_{50} da amostra de 25 apartamentos é de $6.9 h^{-1}$, com um coeficiente de variação, C_v , de 38 %. Ambos os valores estão em linha com os valores apontados em estudos da especialidade que referem valores de RPH_{50} entre $3.5 h^{-1}$ e $11 h^{-1}$ (Kalames, 2007; Sinnott, *et al.*, 2012; Pinto, *et al.*, 2011; Hens, 2011);
- As medições efetuadas em apartamentos sem introdução de modificações pelos utilizadores revelam um valor decrescente de RPH_{50} , da tipologia T1 para a T4. Esta tendência não se observa para o parâmetro q_{50} ;
- O valor médio do parâmetro RPH_{50} é inferior para os apartamentos construídos pelo empreiteiro E2 (Quadro 3.30), o que revela um maior requinte no tratamento das singularidades da fachada. Contudo, a análise do parâmetro q_{50} não introduz qualquer informação adicional, como seria suposto para este tipo de edifícios, mais dependentes da qualidade no tratamento das singularidades do que do comportamento global da envolvente;
- O cálculo do valor de RPH_{50} , relativo à execução de 6 apartamentos de tipologia T3 pelo empreiteiro E2, revela um valor do coeficiente de variabilidade, C_v , igual a 12 %. Ao contrário do que seria de esperar, trata-se de um valor particularmente elevado, o que põe a descoberto uma deficiente qualidade da mão-de-obra de execução;
- Os apartamentos de tipologia T3 modificados pelos ocupantes apresentam um valor médio do parâmetro RPH_{50} de $4.24 h^{-1}$, o que evidencia uma tentativa de redução das infiltrações por aplicação de selagens na lavandaria e nas grelhas autorreguláveis. O reduzido rendimento destes agregados motiva a execução das modificações construtivas descritas, na tentativa de ver reduzido ao seu valor mínimo, os gastos com aquecimento. O valor de RPH_{50} obtido é ainda

assim compatível com o valor preconizado na literatura aplicável (Liddament, 1996), muito embora próximo do seu limite inferior, o que indicia nalguns casos a existência de taxas de ventilação insuficientes.

Foi estabelecida uma tentativa de correlação entre os valores de medição da temperatura do ar interior, T_i , na sala, em 24 apartamentos instrumentados no inverno, com o valor da taxa de renovação horária a 50 Pa, RPH_{50} , calculado no Capítulo 3.6.1.

No Quadro 3.31 são apresentados os resultados da temperatura do ar interior na sala, para o período de inverno, para 24 apartamentos instrumentados, e o respetivo valor de RPH_{50} .

Quadro 3.31 - Temperatura do ar interior, T_i , na sala versus RPH_{50}

Apartamento	$T_i(^{\circ}\text{C})$ - inverno	$RPH_{50} (\text{h}^{-1})$
12 / 46 / 11	14.76	12.65
12 / 46 / 41	16.22	12.85
14 / 56 / 22	16.16	4.53
14 / 56 / 42	18.19	4.41
14 / 70 / 22	14.51	5.34
14 / 88 / 12	16.39	6.44
14 / 88 / 32	16.27	3.35
14 / 88 / 42	16.91	5.26
14 / 106 / 11	15.99	7.25
14 / 126 / 12	14.64	6.58
14 / 140 / 41	16.24	6.82
14 / 174 / 11	15.39	8.30
14 / 174 / 22	13.03	7.38
14 / 174 / 42	13.07	9.06
15 / 63 / 22	15.15	4.92
15 / 63 / 42	16.98	5.08
15 / 63 / 41	15.97	4.86
15 / 114 / 21	15.51	10.02
15 / 114 / 32	16.22	7.96
15 / 114 / 41	15.38	3.08
15 / 114 / 42	16.99	4.28
15 / 125 / 42	16.80	10.16
15 / 145 / 32	15.54	7.09
15 / 159 / 12	14.08	9.64

O gráfico da Figura 3.64 representa a correlação entre a temperatura do ar interior, T_i , para o período de inverno e a taxa de renovação horária, RPH_{50} , para um conjunto de 24 apartamentos instrumentados. Os resultados obtidos evidenciam uma relação tendencialmente linear entre o valor da temperatura do ar interior e da taxa de renovação horária. Para temperaturas inferiores correspondem taxas de renovação horárias mais elevadas, de acordo com o que seria expetável.

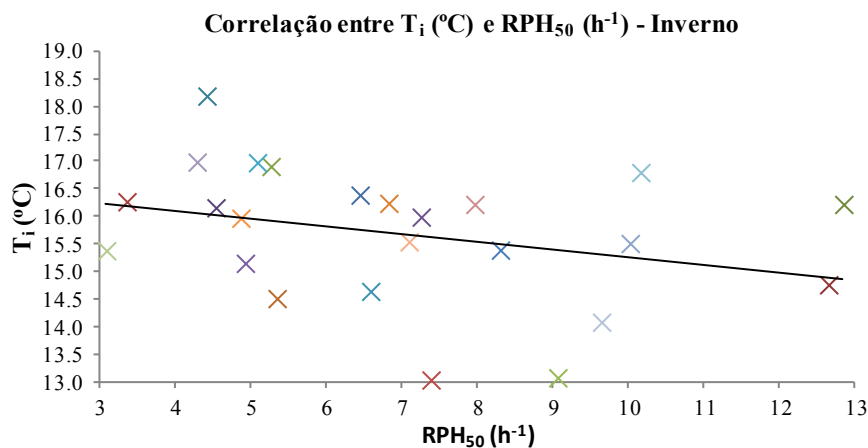


Figura 3.64 – Correlação entre T_i e RPH_{50} para o período de inverno

3.7. CONCLUSÕES

O estudo experimental de monitorização de parâmetros de avaliação do desempenho térmico em edifícios residenciais reabilitados constitui um dos pilares centrais da Tese, cumprindo um objetivo inicialmente definido: a caracterização do desempenho em serviço, durante um período alargado de tempo, de uma amostra representativa de apartamentos do conjunto habitacional de Lordelo. A extensão da campanha de medição *in situ* permitiu a recolha de um conjunto alargado de resultados experimentais que possibilitaram, de forma complementar, o estudo da variabilidade do desempenho térmico em serviço. O estudo implementado concentrou-se na análise da variação da temperatura do ar interior para um conjunto de cenários de utilização definidos. A campanha experimental incluiu ainda o estudo da variabilidade da permeabilidade ao ar da envolvente dos apartamentos da amostra, tendo-se procurado estabelecer uma correlação entre o parâmetro RPH_{50} e a temperatura do ar interior, T_i , para o período de inverno. O trabalho experimental desenvolvido permite estabelecer as seguintes conclusões:

- 1) A medição da temperatura do ar interior do Apartamento-Tipo revela valores próximos dos de referência indicados na regulamentação (RCCTE, 2006). O **valor médio da temperatura do ar interior varia entre 18.80 °C e 19.77 °C, para a estação de aquecimento** (valor de referência igual a 20 °C) e **entre 24.41 °C e 25.27 °C, para a estação de arrefecimento** (valor de referência igual a 25 °C);
- 2) O estudo de frequências acumuladas de temperatura para o Apartamento-Tipo permite concluir que em 38.6 % do número total de horas da estação de aquecimento, não se atinge a temperatura correspondente ao limite de conforto de 18 °C (CEN, 2007). Em 87.8% do total de horas da estação de arrefecimento, o valor da temperatura é inferior ao limite de conforto de 27 °C (CEN, 2007);
- 3) A medição da humidade relativa do ar interior do Apartamento-Tipo revela uma gama de variação entre 20 % e 90 %, para a estação de aquecimento, e entre 35 % e 75 % para a estação de arrefecimento. O estudo de frequências acumuladas de humidade relativa revelou valores particularmente elevados, para estação de arrefecimento. Em apenas 10 % do período de verão, o valor da humidade relativa do ar interior é inferior ao requisito regulamentar de 50 % fixado pelo RCCTE;

4) A aplicação de modelos adaptativos para avaliação do conforto térmico do Apartamento-Tipo, conduz a resultados diferenciados para a estação de aquecimento e de arrefecimento. A percentagem de horas de desconforto, à luz da Categoria III da EN 15251, varia entre 24.2 % (Z3) e 42.8 % (Z1), para a estação de aquecimento, e é nula para a estação de arrefecimento;

5) Em face do exposto nos pontos 1) a 4) conclui-se que a reabilitação dos edifícios afigura-se favorável de um ponto de vista do conforto térmico. A aplicação de uma cobertura bem isolada, de envidraçados com um elevado desempenho térmico e proteção solar e a adoção de dispositivos de ventilação mecânica coletiva nas cozinhas, com funcionamento centralizado e de dispositivos de ventilação mecânica individual nos WC's, constituem soluções suficientes para, num clima temperado como o da cidade do Porto, garantir o conforto térmico para a totalidade da estação de arrefecimento, e para uma parte considerável da estação de aquecimento;

6) A medição dos valores da concentração de CO₂ do Apartamento-Tipo revela valores que ultrapassam 2500 ppm em 50.2 % do período de ocupação do compartimento Z6 (quarto a SW). Trata-se de um quarto de casal ocupado por idosos, deficientemente ventilado, com abertura muito esporádica das janelas. No compartimento Z3 (sala a NE) o valor limite de 2500 ppm é ultrapassado em apenas 12.4 % do período de ocupação. O elevado registo da concentração de CO₂ vem revelar que o sistema de ventilação mecânica coletiva das cozinhas, que supostamente extrairia, em regime contínuo, um caudal variável, não se encontra a funcionar convenientemente, de acordo com o definido no projeto original (de Freitas, 2009). A aplicação de grelhas autorreguláveis nas caixas de estores, não garante, por si só, uma adequada qualidade do ar interior, na ausência de um sistema mecânico de extração de ar a funcionar conforme projetado;

7) O estudo da variabilidade do desempenho térmico da amostra instrumentada, em condições de serviço, nos períodos de verão e de inverno, permitiu avaliar a influência das seguintes variáveis na variação da temperatura do ar interior: período de medição, localização em prumada, fator de forma e ocupação. Os resultados obtidos permitem constatar o seguinte:

a) Sempre que a temperatura média do ar exterior, $T_{med.es}$, num período de medição reduzido, é próximo do valor dessa temperatura no período alargado, os resultados obtidos para período mais curto são representativos dos do período mais longo;

b) A influência da localização dos apartamentos em prumada na variação da temperatura do ar interior, para o período de medição analisado (3 meses de verão e de inverno), é pouco acentuada;

c) A influência do fator de forma dos apartamentos na variação da temperatura do ar interior é pronunciada, tanto no inverno (2.6 °C) como no verão (3.0 °C). O apartamento com menor fator de forma apresenta-se mais quente no inverno e no verão, contribuindo para o efeito os seus elevados ganhos internos;

d) A influência da ocupação dos apartamentos na variação da temperatura do ar interior é pronunciada, tanto no inverno (2.6 °C) como no verão (2.9 °C). Tal como seria de esperar, os apartamentos com maior ocupação são os mais quentes de inverno e de verão;

8) O estudo da variabilidade da permeabilidade ao ar da amostra de 25 apartamentos ensaiada revela um valor médio do parâmetro RPH_{50} igual a 6.9 h⁻¹, com um coeficiente de variação, C_v , de 38 %. Ambos os valores estão em linha com os valores de referência

apontados pela literatura da especialidade. A introdução pelos ocupantes de modificações nas grelhas autorreguláveis e nas lavandarias dos apartamentos de tipologia T3, contribui para uma redução no valor médio do parâmetro RPH_{50} para 4.24 h^{-1} . Os edifícios do conjunto habitacional de Lordelo foram construídos por 2 empreiteiros distintos. O valor médio do parâmetro RPH_{50} é inferior para os apartamentos construídos pelo empreiteiro designado por E2 (Quadro 3.30), o que revela um melhor tratamento das juntas construtivas da fachada, mais suscetíveis em matéria de permeabilidade ao ar;

9) Como conclusão final, importa referir que a caracterização do desempenho em serviço de uma amostra representativa de apartamentos do conjunto habitacional de Lordelo, permitiu perceber que o estudo do conforto térmico dos edifícios de habitação social deveria ser efetuado, de um ponto de vista regulamentar, recorrendo a modelos adaptativos. A aplicação de um modelo de conforto adaptativo constitui uma resposta, que para além de incorporar um maior número de variáveis na avaliação do conforto térmico, garante aos ocupantes do apartamento uma maior flexibilidade na sua utilização.

4

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO EM REGIME DINÂMICO

4.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

A validação do modelo de simulação numérica em regime dinâmico utilizado constitui um dos objetivos primordiais da Tese. Esta validação permitirá posteriormente desenvolver estudos de sensibilidade para um conjunto de cenários de simulação, em 4 localizações geográficas representativas do território nacional, para avaliação do conforto térmico e da eficiência energética do Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional de Lordelo (Capítulo 5), bem como definir critérios de otimização do isolamento das paredes e da ventilação noturna (Capítulo 6).

A simulação numérica em regime dinâmico permite prever o comportamento higrotérmico de um edifício em tempo real (Delgado, *et al.*, 2010). Para desenvolvimento do estudo foi selecionado o programa de cálculo automático *Energyplus* (*EnergyPlus*, 2013), que em regime dinâmico permite construir um modelo geométrico para avaliar de forma fiável, a flutuação da temperatura horária do ar interior em regime de livre variação de temperatura, como indicador do conforto térmico experimentado pelos ocupantes e calcular o consumo energético de aquecimento e de arrefecimento necessários à obtenção do referido conforto (Curado, *et al.*, 2012).

O estudo de validação do modelo utilizado pressupõe a adoção da seguinte metodologia de análise:

- Seleção de um programa de cálculo numérico em regime dinâmico adequado à simulação térmica e energética de edifícios para avaliação do desempenho térmico dentro dos pressupostos e objetivos definidos;
- Construção do ficheiro climático com dados meteorológicos reais medidos pela estação meteorológica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) do Laboratório de Física das Construções (LFC), correspondentes a um período temporal com início a 1 de março de 2012 e fim a 28 de fevereiro de 2013;
- Construção de um modelo geométrico do Apartamento-Tipo simulado, com criação de zonas térmicas e definição das condições fronteira da sua envolvente;
- Caracterização detalhada dos parâmetros necessários à implementação do estudo de simulação numérica: local de implantação do edifício, período de simulação, soluções construtiva dos elementos opacos e envidraçados, sistemas de ventilação e ganhos internos (ocupação, equipamento e iluminação);

- Definição do período de ocupação do Apartamento-Tipo e dos padrões de utilização dos sistemas mecânicos de ventilação, de iluminação e de ativação das proteções solares dos envidraçados;
- Análise dos resultados de simulação do modelo e comparação do valor da temperatura do ar interior, no período de simulação, para as zonas térmicas especificadas, com os resultados de medição reais no mesmo período (Capítulo 3);
- Validação do modelo para 2 períodos do ano distintos: o período de inverno traduzido pelos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e o período de verão traduzido pelos meses de julho, agosto e setembro.

4.2. SELEÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.2.1. ESPECIFICIDADES DO PROGRAMA

Estão disponíveis diversos programas de simulação do comportamento térmico dos edifícios que variam de forma significativa o grau de detalhe com que os seus respetivos modelos tratam os aspetos relacionados com o regime de transferência de calor considerado, os dados de entrada considerados na simulação, bem como as propriedades dos materiais, o clima, as condições fronteira e a geometria da envolvente (Delgado, *et al.*, 2010; Crawley, *et al.*, 2008).

A seleção do programa de cálculo automático a aplicar depende, naturalmente, das variáveis a avaliar e dos parâmetros térmicos a simular (Mendes, *et al.*, 2005).

No âmbito da Tese pretendeu avaliar-se o conforto térmico de um apartamento do conjunto habitacional de Lordelo sem sistemas de climatização instalados, num cenário pós-reabilitação, em regime dinâmico, com livre flutuação da temperatura do ar interior. O programa *EnergyPlus* constitui um dos mais aptos à avaliação do conforto térmico (Crawley, *et al.*, 1999; Crawley, *et al.*, 2008; Topping, *et al.*, 2011), apresentando para o efeito um conjunto de especificidades que o torna adequado à implementação do estudo de simulação pretendido (Crawley, *et al.*, 2008; Wallauer, 2003). Dentre as referidas especificidades destacam-se:

- Fiabilidade na construção de um modelo geométrico no editor gráfico do programa, com divisão do edifício em análise em zonas térmicas;
- Possibilidade de caracterização exaustiva das ações de natureza climática, das propriedades dos materiais, dos sistemas de ventilação, e dos ganhos internos de ocupação, de equipamento e de iluminação;
- Facilidade de implementação de estudos de análise de sensibilidade ao modelo criado, com variação expedita dos parâmetros de simulação e posterior análise simplificada de resultados;
- Diversidade de parâmetros higrotérmicos a simular. O programa permite analisar os parâmetros higrotérmicos de que depende o estudo do conforto térmico (temperatura do ar interior, humidade relativa, velocidade do ar, temperatura média radiante, nível de atividade e vestuário do ocupante) e os parâmetros de que depende o estudo energético (consumos energéticos de aquecimento e de arrefecimento);
- Multiplicidade de resultados obtidos. Após simulação o programa permite a análise dos resultados obtidos em intervalos espaçados de 15 min;

- Fiabilidade dos resultados obtidos. O método *BestTest* desenvolvido pela *International Energy Agency* (IEA), avalia a precisão da simulação dos programas de simulação em regime dinâmico, tendo sido escolhido pela ASHRAE 140 (ASHRAE, 2001) para validação dos programas de simulação por recurso a testes comparativos (Westphal, *et al.*, 2004; Mendes, *et al.*, 2005).

Existem no mercado várias soluções que permitem criar os modelos de uma forma mais simples e imediata (DesignBuilder, 2011), contudo a facilidade gráfica no apoio à criação dos modelos de simulação numérica, não permite um domínio tão aprofundado dos recursos disponibilizados pelo *EnergyPlus*. Optou-se, pesando as vantagens e as limitações, pela utilização do programa *EnergyPlus*.

4.2.2. CÁLCULO DO BALANÇO TÉRMICO NO PROGRAMA *ENERGYPLUS*

O modelo adotado pelo programa *EnergyPlus* (*EnergyPlus*, 2013) estabelece a inter-relação entre o balanço térmico superficial, as trocas térmicas ao nível do ar interior e as condições fronteira aos elementos construtivos analisados. Entra em linha de conta com o efeito das transferências de calor por condução, convecção e radiação, e das transferências de massa determinadas por fenómenos de ventilação e de infiltração de ar. A estas parcelas são ainda adicionados o ganho total determinado pelos sistemas de iluminação, pelos equipamentos instalados e pelos ocupantes, de acordo com o representado na Figura 4.1.

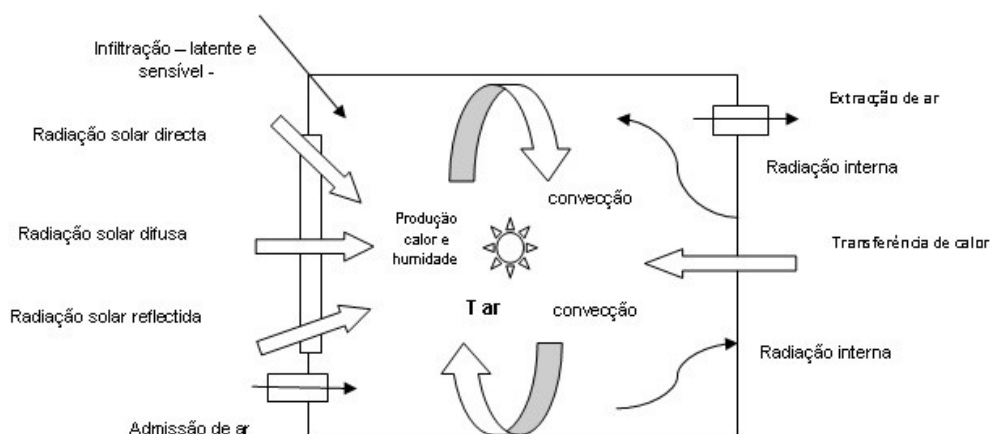


Figura 4.1 – Balanço térmico

O estudo do balanço térmico no programa *EnergyPlus* é efetuado de forma integrada, envolvendo 2 cálculos distintos (*EnergyPlus*, 2013):

- O cálculo do balanço térmico interior à zona térmica considerada;
- O cálculo do balanço térmico superficial, isto é, o estudo das trocas térmicas na superfície exterior e na superfície interior dos elementos construtivos envolventes à zona térmica.

Uma zona térmica não constitui necessariamente um compartimento individualizado, um quarto ou uma sala de um apartamento, mas sim um espaço, ou um conjunto de espaços, sujeito a condições de controlo térmico similar. As diversas zonas térmicas estabelecidas podem interagir estabelecendo trocas de calor através das superfícies que partilham e dos fluxos de ar que movimentam (Melo, *et al.*, 2009; Westphal, 2006). Assume-se que a massa de ar interior a uma dada zona térmica se encontra perfeitamente homogeneizada, com uma temperatura uniforme. São consideradas complementarmente as seguintes hipóteses simplificativas relativas às superfícies dos elementos construtivos envolventes à zona térmica (*EnergyPlus*, 2013):

- A temperatura superficial das várias superfícies apresenta valor uniforme;
- A radiação de onda longa e de onda curta emitida apresenta um valor uniforme;
- Há troca de radiação difusa entre as diversas superfícies;
- O fluxo de calor por condução que atravessa os elementos de construção é unidirecional, na direção perpendicular à superfície do elemento construtivo atravessado.

Balanço Térmico Interior

Em virtude de no interior de cada zona térmica se considerar que o volume de ar se encontra perfeitamente homogeneizado, torna-se suficiente analisar um único ponto, isto é, um único nó para efeitos de caracterização da temperatura do ar interior.

O cálculo da temperatura do ar interior é obtido por resolução da equação de conservação de energia (1.ª Lei da Termodinâmica) que traduz um balanço térmico para a zona térmica em análise (Equação 4.1):

$$C_z \frac{dt_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superfícies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_e - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (4.1)$$

em que

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$: Somatório dos ganhos internos por convecção - [kWh]

$\sum_{i=1}^{N_{superfícies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$: Transferência calor por convecção à superfície dos elementos da zona térmica- [kWh]

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$: Transferência de calor entre o ar das diferentes zonas térmicas - [kWh]

$\dot{m}_{inf} C_p (T_e - T_z)$: Transferência de calor por infiltração do ar exterior - [kWh]

$C_z \frac{dt_z}{dt}$: Energia total armazenada em cada zona térmica - [kWh]

h_i : Condutância térmica superficial - [W/m².°C]

A_i : Área da superfície i - [m²]

T_{si} : Temperatura da superfície i - [°C]

T_z : Temperatura do ar na zona térmica - [°C]

\dot{m} : Fluxo de massa - [kg/m².s]

T_e : Temperatura do ar exterior - [°C]

C_p : Calor específico -[J/kg.°C]

T_{zi} : Temperatura do ar na zona térmica i - [°C]

\dot{Q}_{sys} : Transferência de calor a partir de sistemas de climatização – output dos sistemas - [kWh]

No balanço térmico expresso pela Equação 4.1, definem-se dois tipos de superfícies, as que armazenam e as que transferem calor. As superfícies que armazenam calor são as que se encontram no interior da zona térmica considerada e as que separam espaços ou zonas térmicas a temperatura idêntica. As superfícies que transmitem calor são aquelas que se encontram na envolvente exterior da zona térmica, ou as superfícies que separam espaços ou zonas térmicas a diferentes temperaturas. Estas superfícies interagem com o ar da zona térmica por convecção.

Balanço Térmico Superficial

O programa *EnergyPlus* integra três modelos para cálculo do balanço térmico superficial: *Conduction Transfer Function (CTF) Model*, *Combined Heat and Moisture Transfer (HAMT) Model* e o *Effective Moisture Penetration Depth (EMPD) Model* (*EnergyPlus*, 2013):

- O modelo *CTF* relaciona o fluxo de calor por condução que atravessa a superfície de um elemento de construção com o “histórico” de temperaturas em ambas as faces do elemento em análise. Este modelo avalia, em regime transiente, a transferência de calor sensível, desprezando no cálculo o armazenamento e a difusão de vapor através dos elementos de construção;
- Os modelos *HAMT* e *EMPD* constituem modelos integrados de calor, ar e humidade (*Heat-Air-Moisture*), que permitem uma análise conjunta dos fenómenos de transmissão de calor, transporte de ar e de humidade nos edifícios e nos elementos de construção, em condições de serviço (*EnergyPlus*, 2013);
- A aplicação do modelo *HAMT* obriga a uma caracterização detalhada das propriedades dos diversos materiais que constituem os elementos de construção, sendo usualmente adotado em cenários de simulação da transferência de calor e de humidade através das camadas que constituem os elementos de construção (*EnergyPlus*, 2013);
- O modelo *EMPD* constitui uma simplificação do modelo *HAMT*. Neste modelo é assumido que apenas uma camada localizada na superfície interior do elemento de construção, se comporta de forma dinâmica e efetua trocas de vapor de água com o ar interior. A difusão de vapor de água entre o exterior e o interior é, deste modo, desprezada (*EnergyPlus*, 2013).

O estudo de simulação numérica da Tese adota o modelo *EMPD*. Assume-se que a camada interior absorve e liberta humidade para a zona interior quando exposta a variações de humidade no ar. Para cenários em que a variação da humidade do ar interior não é muito significativa e a absorção/desabsorção de vapor de água é baixa, o modelo *EMPD* constitui uma boa aproximação ao cenário real (*EnergyPlus*, 2013). Muito embora o estudo de simulação numérica da Tese se centre na variação da temperatura do ar interior, o modelo está preparado para futuros estudos que se venham a desenvolver no domínio da higrotérmica.

Assumindo que a camada que contribui para a inércia higroscópica interior tem espessura L , o modelo *EMPD* considera que a adsorção apenas ocorre numa camada da sua superfície de espessura constante δ_M , de acordo com o indicado na Equação 4.2:

$$\int_0^L u(x) dx = u \cdot \delta_M \quad (4.2)$$

em que

L : Espessura da camada higroscópica - [m]

δ_M : Espessura da camada de adsorção - [m]

u : Teor de humidade em massa de um material - [kg/kg]

A expressão de cálculo da adsorção de água, em equilíbrio isotérmico, para a generalidade dos materiais de construção é traduzida pela Equação 4.3:

$$u = a \cdot \varphi^b + c \cdot \varphi^d \quad (4.3)$$

em que

φ : Humidade relativa do ar (variável entre 0 e 1) - [-]

a, b, c, d : Coeficientes que relacionam a humidade contida nos materiais de construção com a humidade relativa do ar - [-]

Para aplicação do modelo *EMPD* no *EnergyPlus* é necessário obter o valor dos coeficientes a, b, c e d da equação da curva de adsorção do material higroscópico considerado da camada interior da superfície e estimar o valor de δ_M por aplicação da expressão traduzida pela Equação 4.4 (Cunningham, 1992; Hagentoft, 2001). A espessura da camada de adsorção obtida é de apenas alguns milímetros, para ciclos diários de variação de humidade, e de alguns centímetros para ciclos anuais de variação:

$$\delta_M = \sqrt{\frac{\delta_{mat} \cdot p_{sat} \cdot t_p}{\rho \cdot \xi \cdot \pi}} \quad (4.4)$$

em que

δ_{mat} : Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material - [kg/(m.s.Pa)]

p_{sat} : Pressão de saturação - [Pa]

t_p : Período de um ciclo de variação do material - [s]

ρ : Massa volúmica do material - [kg/m³]

ξ : Capacidade higroscópica específica do material - [kg/kg]

π : Permeabilidade ao vapor - [kg/m.s.Pa]

4.3. CONSTRUÇÃO DO FICHEIRO CLIMÁTICO

4.3.1. FICHEIRO CLIMÁTICO ANUAL DO TIPO *TMY*

Um formato comum de representação dos dados climáticos para aplicação em programas de simulação do comportamento térmico em regime dinâmico, é o formato *Typical Meteorological Year (TMY)*.

O formato *TMY* foi desenvolvido pelo *Sandia National Laboratories*. (EnergyPlus, 2013). O método *Sandia* consiste numa abordagem empírica que seleciona meses individuais de diferentes anos do período considerado. Por exemplo, no caso de considerar um período de 30 anos de dados, todos os 30 janeiros são examinados e o considerado mais representativo do clima local ao longo do período de registo é selecionado para incluir no formato *TMY*. Os outros meses do ano são tratados da mesma maneira, compilando então, os 12 meses típicos selecionados formando um ano completo. A utilização da média dos dados anuais não seria representativa do clima devido à variabilidade dos dados. Sendo assim, para criar o ficheiro, é usado para cada mês do ano do ficheiro *TMY*, o mês mais representativo do clima do local.

O *EnergyPlus* disponibiliza ficheiros de dados climáticos em formato *TMY* para as cidades de Lisboa, Porto, Faro, Évora, Bragança, Coimbra, Funchal e Lajes, desenvolvidos para o território nacional pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), tendo como base de análise os dados climáticos publicados pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG) entre 1951 e 1980, ao longo de um período de 30 anos.

O formato *TMY* representa as condições julgadas típicas para um período de tempo de 30 anos. Como representa condições típicas, não é aconselhável para realizar simulações num período de tempo datado. Neste caso, é conveniente utilizar-se um ficheiro climático com dados meteorológicos reais, ou seja, dados climáticos medidos no período de simulação desejado, e não dados referentes a um período representativo.

4.3.2. FICHEIRO CLIMÁTICO ANUAL DO TIPO *REAL-TIME WEATHER*

Para validação do modelo de simulação numérica construiu-se um ficheiro climático com dados meteorológicos reais, do tipo *Real-Time Weather*, tendo como base os dados climáticos da estação meteorológica do LFC (Capítulo 3.2.4.4.).

Os dados meteorológicos recolhidos foram convertidos num ficheiro climático válido, reconhecido pelo *EnergyPlus*, em formato *EPW*. No Quadro 4.1 encontram-se representados os dados climáticos contidos num ficheiro climático com extensão *EPW*.

Quadro 4.1 - Dados climáticos contidos num ficheiro climático *EPW* (adaptado de *EnergyPlus*, 2013)

Local (Nome, Latitude, Longitude, Elevação, Hora GMT)	Pressão Atmosférica
Fonte de Dados	Taxa de Humidade
Comentário	Humidade Relativa
Condições de Projeto	Velocidade do Vento
Períodos Típicos/Extremos	Direção do Vento
Período de Dados	Temperatura do Céu
Férias/Horário de verão	Radiação Solar (Normal, Global, Difusa)
Graus-Dias	Iluminância (Normal, Global, Difusa)
Ano	Cobertura do Céu (Quantidade de Nuvens)
Mês	Cobertura do Céu Opaco
Dia	Visibilidade
Hora	Temperaturas do Solo (Mensalmente)
Minuto	Observações do Tempo Presente e Códigos (Neve, Chuva)
Temperatura Bolbo Seco	Precipitação
Temperatura Bolbo Húmido	Profundidade de Neve
Temperatura Ponto de Orvalho	Dias desde a Última Queda de Neve

A construção do ficheiro climático com dados meteorológicos reais teve como referência o ficheiro climático *TMY* para a cidade do Porto. Este ficheiro foi editado, tendo sido substituídos os seguintes dados climáticos fornecidos estação meteorológica do LFC: temperatura do ar exterior, T_e , humidade relativa exterior, HR_e , temperatura ponto de orvalho, θ_{po} , intensidade de radiação direta normal, I_i e intensidade de radiação difusa horizontal, I_{dg} . Os restantes dados do ficheiro climático *TMY* do Porto foram mantidos inalterados, dado constituírem valores de referência, com reduzida influência nos resultados da simulação.

Os dados climáticos relativos à temperatura ponto de orvalho, θ_{po} , e à intensidade de radiação direta normal, I_i , não constam, de forma explícita, dos dados fornecidos pela estação meteorológica do LFC (Capítulo 3.2.4.4.), pelo que tiveram de ser calculados.

A temperatura ponto de orvalho, θ_{po} , é calculada pela expressão traduzida pela Equação 4.5 (Henriques, 2011):

$$\theta_{po} = \frac{273.3 * \left(\ln(HR_e) + \frac{17.269 \cdot T_e}{237.3 + T_e} \right)}{17.269 - \left(\ln(HR_e) + \frac{17.269 \cdot T_e}{237.3 + T_e} \right)} \quad (4.5)$$

em que

θ_{po} : Temperatura de ponto de orvalho - [°C]

T_e : Temperatura do ar exterior - [°C]

HR_e : Humidade relativa do ar exterior- [%]

A intensidade de radiação global numa superfície de azimute α e inclinação β resulta da soma de 3 parcelas: a parcela referente à componente direta do sol, a referente à componente difusa do céu e a referente à componente difusa resultante da reflexão no contorno, de acordo com a Equação 4.6 (Canha da Piedade, *et al.*, 2009):

$$I_{\alpha\beta} = I_i \cdot \cos i + F_{ceu} \cdot I_{dh} + F_{solo} \cdot \rho_{solo} \cdot I_{gh} \quad (4.6)$$

em que

$I_{\alpha\beta}$: Intensidade de radiação global numa superfície de azimute α e inclinação β - [W/m²]

I_{gh} : Intensidade de radiação global numa superfície horizontal - [W/m²]

I_{dh} : Intensidade de radiação difusa numa superfície horizontal - [W/m²]

I_i : Intensidade de radiação direta numa superfície normal aos raios solares - [W/m²]

ρ_{solo} : Fração da intensidade de radiação global refletida pelo contorno - [%]

F_{ceu} : Fator de forma entre a superfície e o céu - [-]

F_{solo} : Fator de forma entre a superfície e o solo - [-]

$\cos i$: Projeção dos raios solares sobre a normal à superfície - [-]

Enquanto o valor da intensidade de radiação global em superfície horizontal, I_{gh} e da intensidade de radiação difusa em superfície horizontal, I_{dh} , são fornecidos pela estação meteorológica do LFC, a intensidade de radiação direta normal, I_i , é obtida a partir de I_{dh} , I_{gh} , e da altura solar, h , de acordo com a expressão traduzida pela Equação 4.7 (Canha da Piedade, *et al.*, 2009):

$$I_i = \frac{I_{gh} - I_{dh}}{\sin h} \quad (4.7)$$

em que

I_{gh} : Intensidade de radiação global numa superfície horizontal - [W/m²]

I_{dh} : Intensidade de radiação difusa numa superfície horizontal - [W/m²]

I_i : Intensidade de radiação direta numa superfície normal aos raios solares - [W/m²]

h : Altura solar - [m]

Na sequência do cálculo de ϑ_{po} e I_t procedeu-se à substituição no ficheiro climático *TMY* do Porto dos valores referentes aos seguintes dados climáticos: temperatura, humidade relativa, temperatura ponto de orvalho, intensidade de radiação global em superfície horizontal, intensidade de radiação difusa em superfície horizontal e intensidade de radiação solar normal.

4.4. CONSTRUÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO

A simulação numérica por períodos extensos e com recurso a modelos complexos, é um processo computacionalmente exigente e demorado. A utilização de modelos detalhados aumentaria o tempo de simulação que seria impraticável. Recorreu-se, como tal, à utilização de modelos simplificados, isto é, modelos de geometria simplificada, com um número reduzido de zonas térmicas a simular, com condições-fronteira bem identificadas e com uma dimensão razoável de parâmetros de simulação.

A modelação de um edifício inicia-se com a criação da sua geometria. Para tal seleccionou-se um apartamento de tipologia T3, tipologia dominante do conjunto habitacional, ocupado por 5 residentes, implantado no 4.º piso do edifício. A execução do modelo geométrico implicou a consulta do projeto original e a visita ao local para efetuar o levantamento dimensional. A Figura 4.2 representa uma planta cotada do Apartamento-Tipo, com identificação dos compartimentos e da orientação solar.

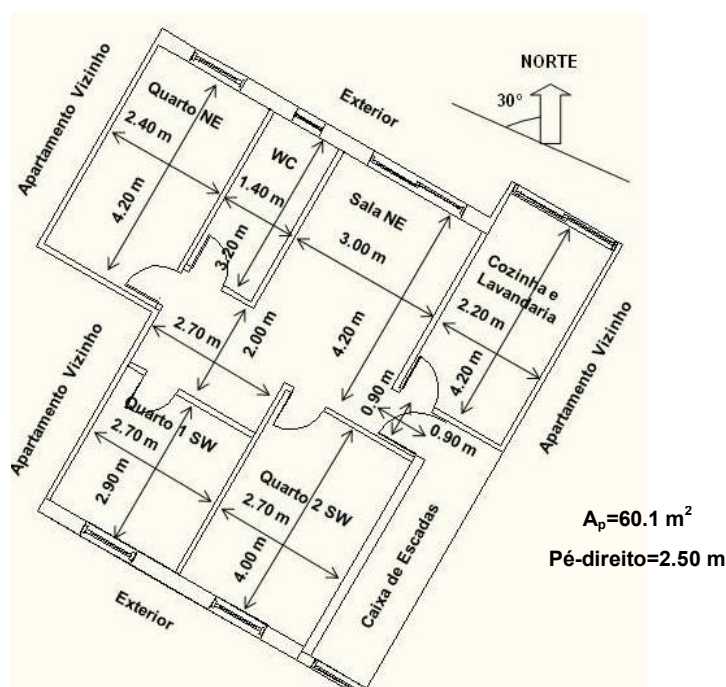


Figura 4.2 – Planta cotada do Apartamento-Tipo

A definição das condições-fronteira do espaço simulado permite, por um lado, especificar quais as superfícies que constituem o “envelope” do Apartamento-Tipo, e por outro, definir as condições de exposição ao vento e à radiação solar das várias superfícies identificadas.

As condições-fronteira estão definidas, em planta, na Figura 4.3. A cor vermelha está representada a envolvente exterior, a amarelo a envolvente interior de separação com zonas comuns, materializada pela parede da caixa de escadas, e a verde a envolvente interior de separação com outros apartamentos, materializada pela parede de separação com a cozinha e lavandaria do apartamento vizinho e pelo pavimento de separação com o apartamento do piso inferior.

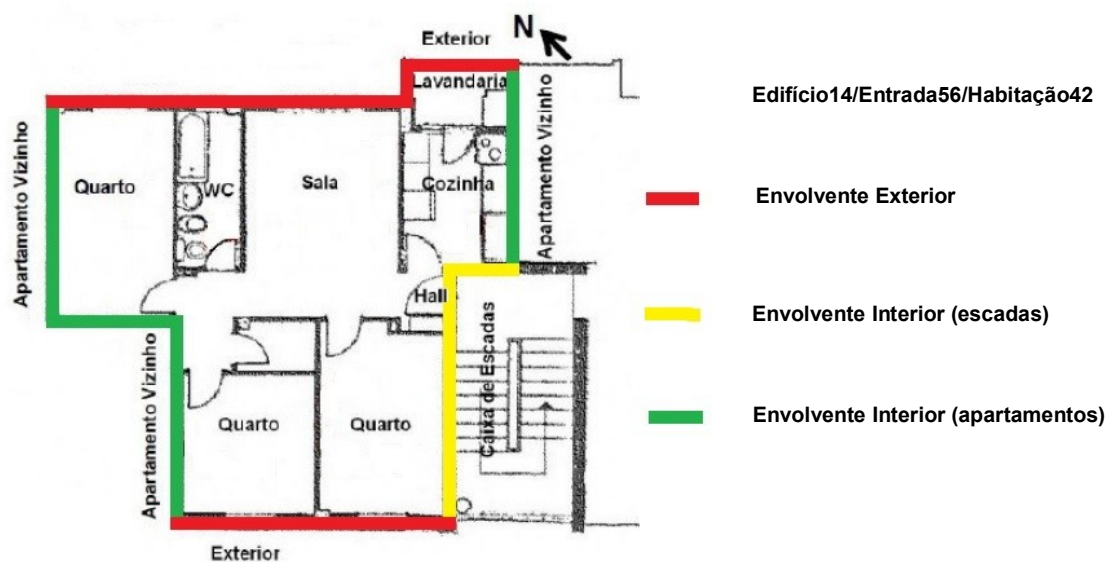


Figura 4.3 – Marcação da envolvente do Apartamento-Tipo em planta

A Figura 4.4 representa a envolvente do Apartamento-Tipo nos alçados SW e NE. No alçado SW estão representados 2 quartos e no alçado NE, o restante quarto, a sala, a instalação sanitária e a cozinha e lavandaria. Nas Figuras 4.5 e 4.6 mostra-se os vãos envidraçados de cada 1 dos compartimentos do Apartamento-Tipo, nos alçados SW e NE respetivamente.

Edifício 14/Entrada56/Habitação42

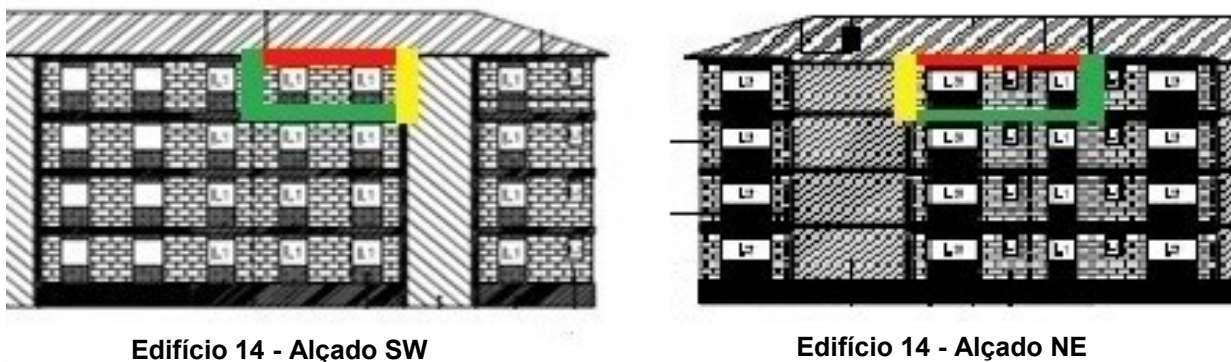


Figura 4.4 – Marcação da envolvente do Apartamento-Tipo nos alçados do Edifício 14

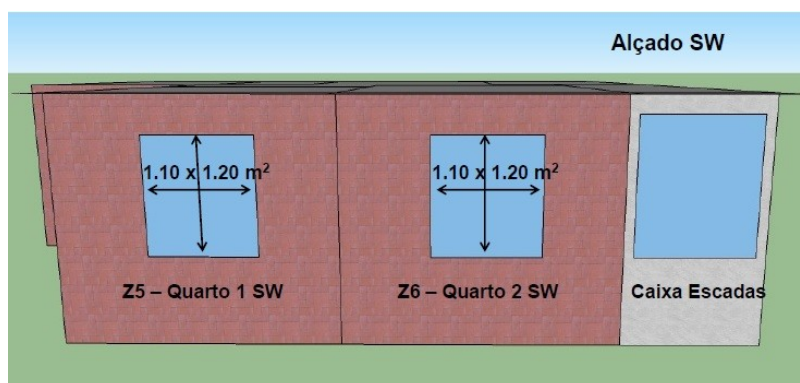


Figura 4.5 – Marcação dos envidraçados do Apartamento-Tipo no alçado SW

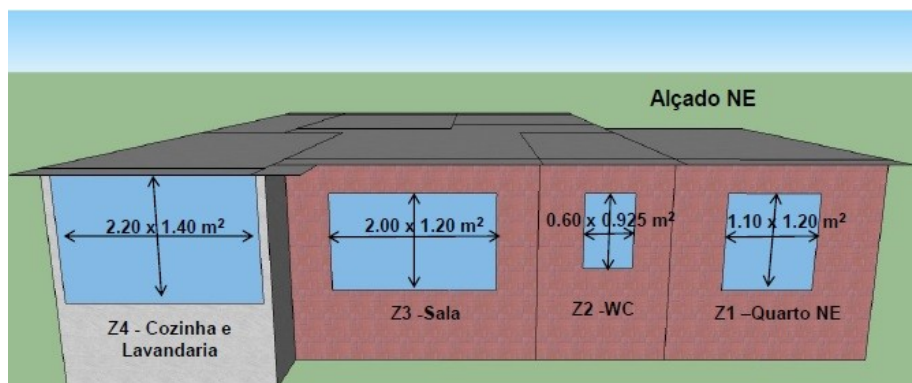


Figura 4.6 – Marcação dos envidraçados do Apartamento-Tipo no alçado NE

A Figura 4.7 representa o modelo de simulação gráfica construído no programa *EnergyPlus*. O Apartamento-Tipo foi repartido em 6 zonas térmicas consideradas para o efeito. O programa desenvolve um ficheiro CAD tridimensional, a partir das coordenadas geométricas introduzidas para cada um dos nós do modelo. Cada zona térmica considerada corresponde a um compartimento, ou à agregação de vários compartimentos com características de comportamento térmico similar, para o qual se estabelece, de forma autónoma, o estudo de desempenho. Para implementação do modelo foram consideradas as seguintes zonas térmicas:

- Zona térmica Z1, constituída pelo quarto de dormir de casal orientado a NE;
- Zona térmica Z2, constituída pelo WC;
- Zona térmica Z3, constituída pela sala de estar e *hall*;
- Zona térmica Z4, constituída pela cozinha e pela lavandaria;
- Zona térmica Z5, constituída pelo quarto de dormir individual orientado a SW;
- Zona térmica Z6, constituída pelo quarto de dormir de casal orientado a SW.

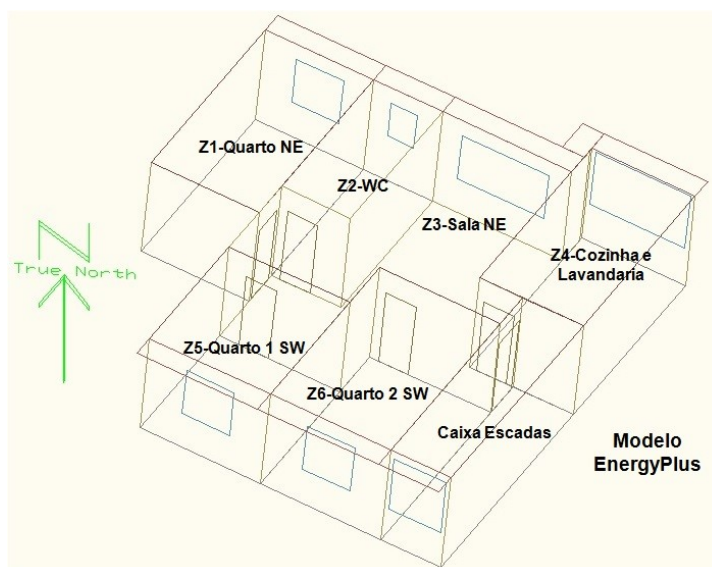


Figura 4.7 – Modelo de simulação gráfica do Apartamento-Tipo

Cada zona térmica especificada é tratada de forma autónoma na definição das suas condições fronteira (Figura 4.8). Nesta definição é especificada tanto a envolvente exterior, como a envolvente de separação com as restantes zonas térmicas, assim como a envolvente de separação com as zonas

interiores climatizadas, definidas como superfícies adiabáticas e com as zonas interiores não climatizadas.



Figura 4.8 – Modelo de simulação gráfica do Apartamento-Tipo

Conforme representado na Figura 4.9, o Apartamento-Tipo localiza-se no último piso do Edifício 14. A envolvente de separação do Apartamento-Tipo com o desvão de cobertura foi identificada como envolvente exterior. O projeto (de Freitas, 2009) especificou a aplicação de duas séries de aberturas para entrada e saída de ar em cada vertente, repartidas pela cumeeira e beirais, com área útil mínima por série igual a 1/500 da superfície projetada da vertente da cobertura com um limite máximo de 400cm² por metro linear (Figura 4.9). De acordo com o Anexo VII do RCCTE, um desvão de cobertura com uma relação s/A (área de aberturas/área da cobertura) superior a 1500 mm²/m² configura um espaço fortemente ventilado. A solução de ventilação instalada garante uma relação s/A superior a 1500 mm²/m², pelo que neste contexto a envolvente de separação do Apartamento-Tipo, com o desvão de cobertura é uma envolvente exterior.

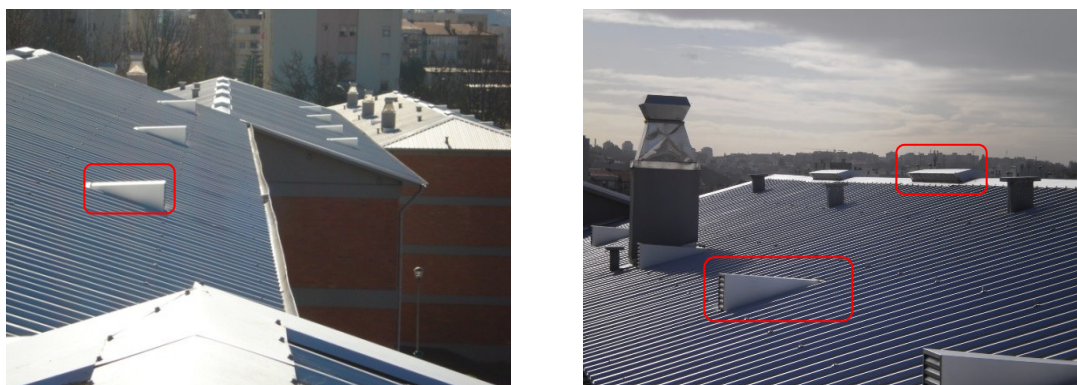


Figura 4.9 – Grelhas de ventilação da cobertura

Para caracterização do comportamento do desvão de cobertura, foram instalados no desvão de cobertura, ao abrigo do efeito da radiação solar direta e da pluviosidade, 2 sensores de temperatura e de humidade relativa. Os sensores foram colocados em local devidamente resguardado, por um período contínuo de 3 meses (1/3/2013 a 1/6/2013) (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Localização dos sensores de temperatura e humidade relativa no desvão

Apresenta-se nas Figuras 4.11 e 4.12 a comparação entre os valores da temperatura e da humidade relativa do ar registados pelos sensores instalados no desvão e medidos no exterior, pelo sensor instalado sobre a cobertura. Assume-se que a proximidade dos sensores à parede de suporte da cobertura pode, devido ao efeito da radiação, ter influenciado os resultados obtidos.

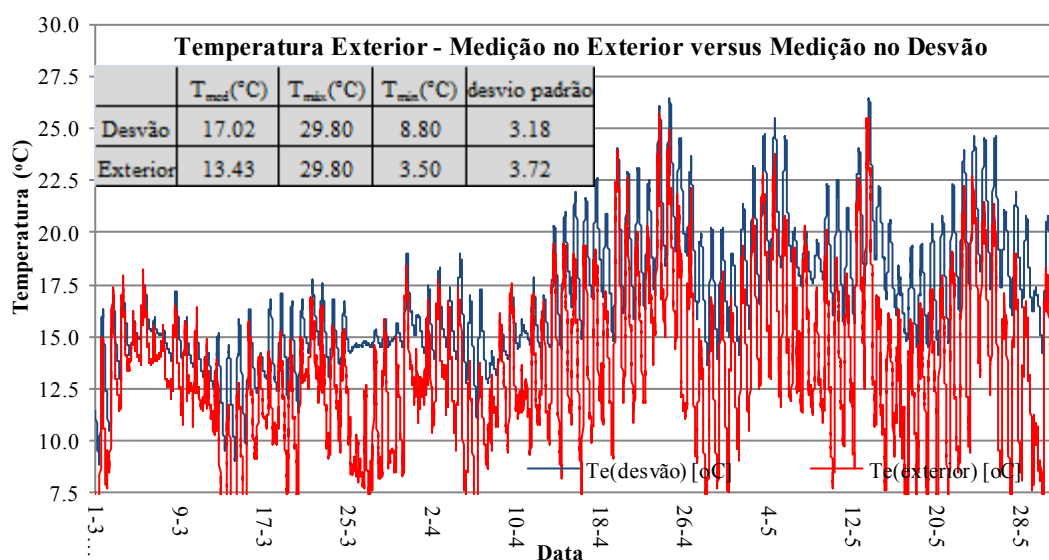


Figura 4.11 – Comparação entre a temperatura do ar medida no exterior e no desvão de cobertura

A análise da Figura 4.11 permite constatar que o valor da temperatura média do ar exterior, registada no período entre 1 de março e 1 de junho de 2013, difere de 3.59 °C do valor registado pela estação meteorológica do LFC. Os valores mínimos distam 5.30 °C e o valor máximo é idêntico para ambas as medições (29.8 °C), destacando o efeito para-sol da cobertura. O cálculo do desvio padrão dos resultados de medição, indicador da sua dispersão em torno do valor médio, permite constatar um valor de 3.18 °C para a medição no desvão e de 3.72 °C para a medição no exterior. Destaca-se de forma muito episódica (dia 25/04 às 21 horas) diferenças de temperaturas a rondar os 10 °C. Estas situações são muito excecionais e surgem em picos que se esbatem em poucos minutos.

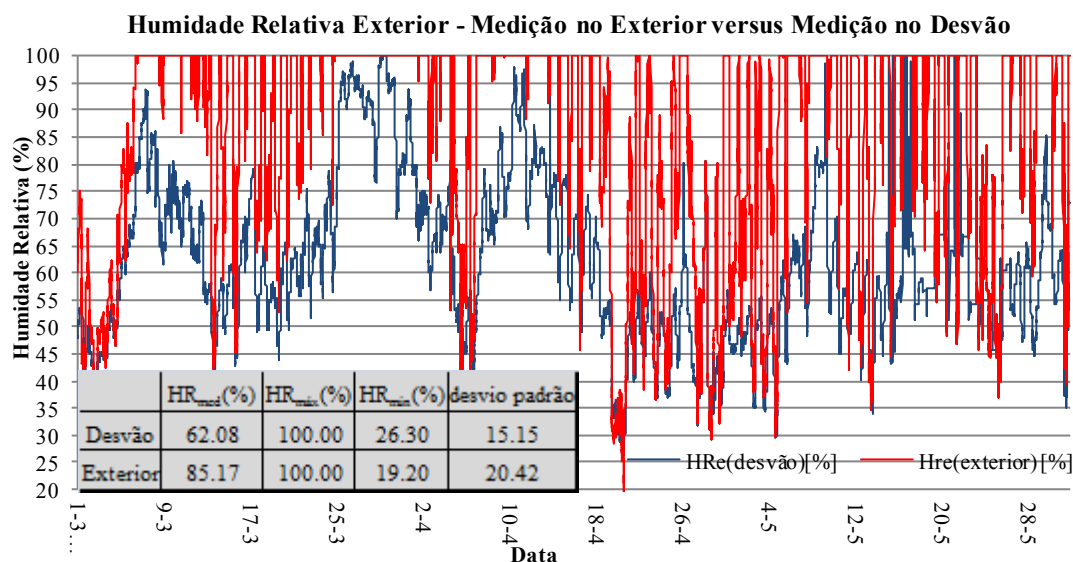


Figura 4.12 – Comparação entre a humidade relativa do ar medida no exterior e no desvão da cobertura

A análise da Figura 4.12 permite observar um valor médio da humidade relativa do ar exterior mais elevado em 23.09 % para as medições efetuadas no exterior, com um desvio padrão da amostra de resultados próximo entre si.

A diferença entre os valores médios da temperatura (3.59 °C) e da humidade relativa (23.09 %) para as duas medições não é significativa, pelo que o pressuposto considerado no projeto mantém-se válido. O desvão de cobertura é um espaço fortemente ventilado, e a envolvente de separação entre o Apartamento-Tipo e o desvão é uma envolvente exterior.

Conclui-se que a solução considerada para a envolvente do apartamento-tipo é adequada, e que as condições-fronteira especificadas na construção do modelo geométrico foram bem definidas.

4.5. CARATERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

4.5.1. INTRODUÇÃO

A criação de um modelo de simulação numérica implica, numa fase posterior à formulação da geometria do Apartamento-Tipo (Capítulo 4.4), a caracterização dos parâmetros necessários à implementação do modelo. Foram especificados um conjunto de parâmetros de simulação e posteriormente caracterizados de forma detalhada. Nessa análise destaca-se:

- A caracterização do edifício e do seu local de implantação (Capítulo 4.5.2);
- A definição do período de simulação tendo como suporte o ficheiro climático usado pelo programa (Capítulo 4.5.3);
- A caracterização das propriedades e características dos elementos construtivos (Capítulo 4.5.4);
- A caracterização dos sistemas de ventilação (Capítulo 4.5.5);
- A caracterização dos ganhos internos de iluminação, de ocupação e dos equipamentos instalados (Capítulo 4.5.6).

A implementação de padrões de utilização dos sistemas de ventilação, iluminação e de ativação das proteções solares, com definição do período de funcionamento em função da ocupação especificada para o Apartamento-Tipo será desenvolvida no Capítulo 4.5.7.

4.5.2. LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

A localização do edifício fica devidamente caracterizada com a definição de 3 parâmetros necessários à implementação do estudo de simulação:

- Definição da orientação solar face ao norte geográfico. O ângulo medido em planta entre a fachada nordeste do Edifício 14 e o norte geográfico é de 30° (Quadro 4.2);
- A definição da rugosidade do local. O terreno encontra-se localizado em ambiente urbano numa zona acidentada com obstáculos que resultam da existência de edifícios adjacentes (Quadro 4.2);
- A caracterização da exposição do edifício ao efeito da radiação solar. A exposição solar do edifício permite que a totalidade da radiação incidente seja absorvida por pavimentos e paredes e que os sombreamentos existentes sejam produzidos por elementos exteriores, tais como palas e varandas (Quadro 4.2).

Quadro 4.2 - Parâmetros de localização do edifício

Parâmetro	Caracterização
Orientação Solar – Norte	30°
Rugosidade	Ambiente Urbano
Exposição Solar do Edifício	Interior e Exterior

4.5.3. PERÍODO DE SIMULAÇÃO

O período de simulação é estabelecido com base no ficheiro climático utilizado pelo programa, tendo sido para o efeito considerado um período anual com início a 1 de março de 2012 e término a 28 de fevereiro de 2013. A implementação da simulação numérica em regime dinâmico tem como objetivo proceder à validação do modelo adotado, pelo que o período de simulação definido coincidiu com o período de instrumentação *in situ* do Apartamento-Tipo. Foi adotado um intervalo de simulação de 10 minutos, compatível com o intervalo adotado para aquisição de dados experimentais pelas sondas de medição.

4.5.4. CARATERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

4.5.4.1. ENQUADRAMENTO

A modelação do comportamento térmico dos edifícios tem nas propriedades dos materiais, a par da geometria da envolvente e das condições fronteira, os parâmetros de base à implementação de um estudo de simulação numérica (Delgado, *et al.*, 2010). De acordo com o representado na Figura 4.13, as propriedades dos materiais e a sua variação com a temperatura, a humidade e o envelhecimento são variáveis decisivas no estudo de simulação numérica.



Figura 4.13 – Fluxograma de dados para modelos de simulação higrotérmica (adaptado de Delgado, *et al.*, 2010)

A modelação dos elementos construtivos foi devidamente estudada com a caracterização em detalhe das propriedades dos materiais que os constituem. No Quadro 4.3 identificam-se as principais propriedades de carácter higrotérmico consideradas para o estabelecimento de um estudo de simulação de desempenho.

Quadro 4.3 - Principais propriedades higrotérmicas dos materiais (adaptado de Ramos, *et al.*, 2009)

Propriedades Higrotérmicas	
Massa volúmica	Pressão de Sucção
Porosidade	Difusão Líquida
Calor Específico	Fator de Resistência à Difusão
Condutibilidade Térmica	Condutibilidade da Água
Curva Higroscópica	Capacidade Higroscópica Específica
Permeabilidade ao Vapor de Água	Permeabilidade ao Ar
Difusão de Vapor	Histerese da Curva Higroscópica

O estudo desenvolvido centra-se na avaliação do conforto térmico, pelo que de um ponto de vista físico são sobretudo relevantes os fenómenos de transferência de calor e de balanço térmico dos espaços. Neste contexto, do elenco de propriedades higrotérmicas enunciadas no Quadro 4.3, as 3 determinantes para o desenvolvimento dos cálculos são as seguintes propriedades térmicas: massa volúmica, ρ , o calor específico, C_p e a condutibilidade térmica, λ . Trata-se de propriedades essenciais à caracterização dos elementos construtivos.

4.5.4.2. MODELAÇÃO DA ENVOLVENTE OPACA EXTERIOR

No Quadro 4.4 quantificam-se as propriedades higrotérmicas dos materiais que constituem os elementos construtivos da envolvente opaca exterior do edifício, utilizadas no modelo de simulação numérica do Apartamento-Tipo. Para além do valor de ρ , C_p e λ , caracteriza-se a espessura, e , do elemento construtivo, a sua absorvância à radiação térmica (emissividade), $\alpha_{t\acute{e}rmico}$ e à radiação solar, α_{solar} . Os valores de λ e ρ foram extraídos do ITE 50 (Pina dos Santos, *et al.*, 2006) e os de C_p , $\alpha_{t\acute{e}rmico}$ e α_{solar} do manual ASHRAE – Handbook of Fundamentals (ASHRAE, 2005).

Quadro 4.4 - Caracterização dos materiais opacos

Material de Construção	e (m)	λ (W/m.°C)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/Kg. °C)	$\alpha_{t\acute{e}rmico}$ (%)	α_{solar} (%)
tijolo "face à vista"	0.11	0.85*	1800	900	90	60
tijolo 11	0.11	0.41*	1200	900	90	60
tijolo 7	0.07	0.37*	1200	900	90	60
reboco ligantes hidráulicos	0.02	1.30	1900	900	90	60
betão	0.20	2.00	2450	750	90	60
poliestireno extrudido (XPS)	0.08	0.037	33	1210	90	60
cerâmica	0.005	1.3	2300	900	90	60
betão leve	0.05	0.46	1050	960	90	60
madeira	0.04	0.23	810	1200	90	60

* O valor da condutibilidade térmica equivalente para cada material, é obtida pelo quociente entre a sua espessura e a resistência térmica extraída do ITE50 (Pina dos Santos, *et. al.*, 2006).

Em síntese, os valores do coeficiente de transmissão térmica, U , dos principais elementos construtivos da envolvente do Apartamento-Tipo são de 1.3 W/m²°C para a fachada opaca e de 0.45 W/m²°C para a cobertura.

De acordo com o especificado no Capítulo 4.2.2 o modelo *EMPD* permite simular a adsorção e desadsorção de vapor de água à superfície das paredes. Esse mecanismo é concentrado numa camada superficial de espessura, δ_M , da camada de reboco, material determinante para a inércia higroscópica. O cálculo de δ_M segue a sequência apresentada no Quadro 4.5:

Quadro 4.5 - Cálculo da espessura da camada superficial de reboco, δ_M

$\delta_{reboco}^{(1)}$ (kg/m.s.Pa)	$P_{sat}^{(2)}$ (Pa)	$t_p^{(3)}$ (s)	$\rho_{reboco}^{(4)}$ (Kg/m ³)	$\xi^{(5)}$ (-)	$\delta_M^{(6)}$ (mm)
7.6×10^{-12}	2814.63	86400	1900	0.051	2.5

(1) $\mu_{reboco} = 25$, $\delta_{ar} = 190 \times 10^{-12}$ Kg/(m.s.Pa), $\mu = \delta_{ar} / \delta_{reboco}$, $\delta_{reboco} = 7.6 \times 10^{-12}$ kg/(m.s.Pa)

(2) $T = 23^\circ\text{C}$, $P_{sat} = 2814.63$ Pa

(3) Ciclo diário de variação de humidade, $t_p = 24 \times 3600 = 86400$ s

(4) $\rho_{reboco} = 1900$ Kg/m³

(5) $\xi = \left[\frac{\delta y}{\delta x} \right] = [0.062423x^{0.5176}] = 0.050754$ (para $x = 0.65$)

(6) $\delta_M = 2.5$ mm (Equação 4.4)

Foi necessário proceder à quantificação dos coeficientes a , b , c e d da equação da curva de adsorção do material higroscópico, por ajuste da curva relativa ao reboco à Equação 4.3 (Capítulo 4.2.2). Os coeficientes obtidos estão representados na Figura 4.14.

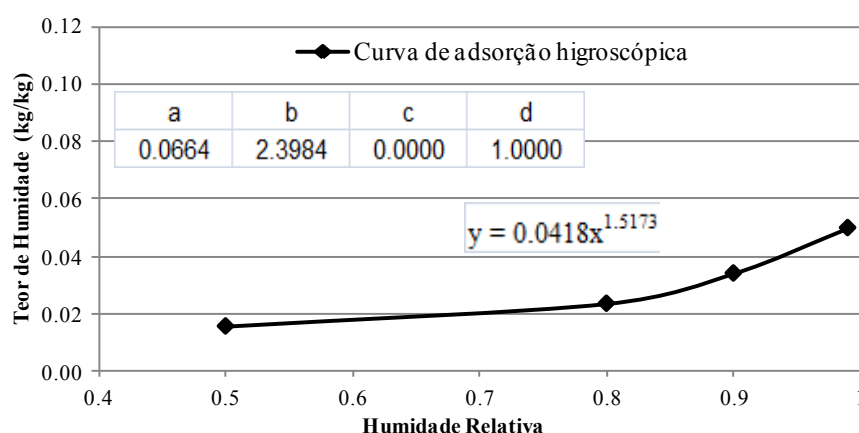


Figura 4.14 – Ajuste da curva de adsorção higroscópica do reboco

4.5.4.3. MODELAÇÃO DA ENVOLVENTE ENVIDRAÇADA EXTERIOR

No Quadro 4.6 e 4.7 quantificam-se, respetivamente, as propriedades térmicas e óticas dos elementos envidraçados da envolvente exterior do edifício e respetivos dispositivos de proteção solar, utilizadas no modelo de simulação numérica do Apartamento-Tipo. No Quadro 4.6 caracteriza-se o coeficiente de transmissão térmica, U , o fator solar, g , e a transmitância de radiação visível, τ_{vis} , dos vãos envidraçados. No Quadro 4.7 caracteriza-se a transmitância de radiação solar, τ_{sol} , a refletância de radiação solar, R_{sol} , a transmitância de radiação visível, τ_{vis} , a refletância de radiação visível, R_{vis} , a espessura, e , e a condutibilidade térmica, λ , do dispositivo de proteção solar.

Quadro 4.6 - Caracterização dos elementos envidraçados*

Vãos Envidraçados	U (W/m ² °C)	$g_{\perp v}$ (-)	$g_{\perp '}$ (-)	τ_{vis} (%)
Quartos e WC	2.8	0.63	0.04	80
Sala	3.0	0.63	0.04	80
Lavandaria	4.8	0.82	-	80

*- O fator solar $g_{\perp v}$ e $g_{\perp '}$ correspondem, respetivamente, ao seu valor sem proteção solar e com a proteção solar ativada.

Quadro 4.7 - Caracterização da proteção solar**

Proteção solar	τ_{sol} (%)	R_{sol} (%)	τ_{vis} (%)	R_{vis} (%)	e (mm)	λ (W/m°C)
Alumínio+PUR	11	56	9	54	8.2	0.038

** - A proteção solar adotada tem 8.2 mm de espessura, constituída por lâminas de alumínio com 2.5 mm de espessura e condutibilidade térmica de 230 W/m°C, preenchidas com camada de 7.95 mm de poliuretano com massa volumica de 75.5 Kg/m³ e condutibilidade térmica de 0.037 W/m°C. A resistência térmica da proteção solar é de 0.215 m²°C/W. O valor da condutibilidade térmica equivalente é de 0.038 W/m°C.

Os valores de U foram extraídos do ITE 50 (Pina dos Santos, *et al.*, 2006), de g_v e g_{\perp} do RCCTE (RCCTE, 2006) e de τ_{vis} do Manual do Vidro (*Saint-Gobain Glass*, 2010). Os valores das características da proteção solar foram extraídos do catálogo técnico (Persax, 2007) e do artigo científico *Thermal Efficiency of the Window Shade* (Yi, *et al.*, 2009).

4.5.5. CARATERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

4.5.5.1. ENQUADRAMENTO

Sempre que não existam dispositivos de ventilação mecânica, a renovação de ar de um edifício resulta da diferença de pressão introduzida pelo efeito conjugado da ação do vento e da diferença de temperatura. O valor da taxa de renovação horária encontra-se dependente do balanço entre estas duas ações. De acordo com a NP 1037-1 (NP, 2002) a ação térmica revela-se eficaz apenas quando a temperatura média do ar interior do edifício apresenta em relação à temperatura média do ar exterior, um diferencial superior a 8 °C, pelo que o seu efeito é de um modo geral levado em consideração, na estação de aquecimento. Na estação de arrefecimento, a ação do vento garante a renovação de ar no interior dos edifícios. A intensificação da ventilação por ação do vento evita o sobreaquecimento do ar interior no período de verão.

É determinante a conjugação do efeito da ventilação com a exaustão de fumos e vapores de combustão gerados nos aparelhos instalados nas cozinhas e de vapor de água dos banhos nos WC's (Viegas, 1996).

O sistema de ventilação correntemente usado em Portugal recorre ao uso de uma extração mecânica intermitente na cozinha, em simultâneo com extração natural nas instalações sanitárias, configurando um sistema misto (Pinto M., 2008).

A ação dos ocupantes na regulação da renovação de ar dos locais, com a abertura e o fecho de janelas, bem como a introdução de mecanismos de admissão de ar, como as grelhas e as aberturas reguláveis, permite um reforço da taxa de renovação de ar e a consequente manutenção da qualidade do ar interior dentro de limites aceitáveis (Viegas, 1996). Contudo, dado que este tipo de ações não é muitas vezes passível de controlo direto, torna-se necessário o recurso a processos de ventilação mecânica.

4.5.5.2. SISTEMA DE VENTILAÇÃO IMPLEMENTADO

O sistema de ventilação implementado para o Apartamento-Tipo foi um sistema de ventilação natural complementado por ventiladores de extração de ar na cozinha e WC (sistema misto).

A estratégia de ventilação engloba todos os compartimentos de forma integrada. A admissão de ar é efetuada nos compartimentos principais (quartos e a sala) e a exaustão nos compartimentos de serviço (cozinha e WC).

A admissão de ar nos compartimentos principais é controlada por grelhas autorreguláveis que garantem um caudal de admissão aproximadamente constante, para uma gama de gradientes de pressão, evitando sempre as exfiltrações de ar. Foram instaladas duas grelhas autorreguláveis na sala e uma em cada quarto, que garantem, por grelha, um caudal de 30 m³/h para um diferencial de pressão entre o ar exterior e interior, ΔP , de 20 Pa, e não excedem um caudal de 45 m³/h para um ΔP de 200 Pa (de Freitas, 2009).

A extração de ar no WC é efetuada com ventilador mecânico individual de 12 V, instalado sobre a banheira na parede de fachada com ligação direta ao exterior, acionado manualmente no período dos banhos, com caudal de extração constante (60 m³/h) e independente do diferencial de pressões.

A extração de ar na cozinha foi projetada (de Freitas, 2009) para ser coletiva, com aplicação de um ventilador mecânico para extração dos apartamentos situados nos 4 pisos superiores do edifício, associado a um interruptor horário, que garantiria um caudal mínimo de 500 m³/h (contínuo) e máximo de 1600 m³/h no período das refeições. Na prática não foi possível concretizar esta solução,

dados que os ocupantes do Apartamento-Tipo instalaram, sobre o fogão da cozinha, um exaustor de gaveta com funcionamento manual que inviabiliza o funcionamento do sistema coletivo. No período entre refeições o exaustor está fechado e a extração é, como tal, nula. No período das refeições, com o exaustor em funcionamento, foi medido com recurso a um termoanemómetro portátil, a velocidade de extração do ar, que permitiu, sabendo o diâmetro da conduta de extração, estimar um caudal de extração de $60 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.5.5.3. MODELAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Foi adotado para o estudo de simulação numérica do Apartamento-Tipo um modelo de ventilação multizona integrando 6 Zonas Térmicas que prevê a interação do fluxo de ar entre estas (Figura 4.15). A ligação entre a Zona Térmica Z6 e a caixa de escadas é efetuada com uma porta estanque que somente será aberta para permitir a entrada e saída dos moradores. Considera-se, de forma simplificada, que o fluxo de ar trocado entre as duas zonas é nulo.

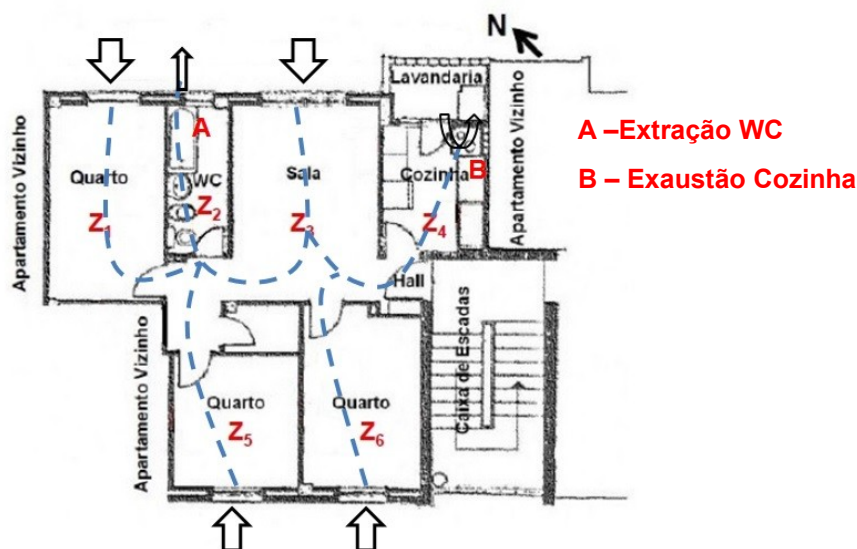


Figura 4.15 – Modelo de distribuição dos fluxos de ar

O modelo implementado (*Airflow Network do EnergyPlus*) tem as seguintes especificidades:

- As grelhas autorreguláveis modeladas têm uma área de admissão de ar por grelha de 42.5 cm^2 ($354 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$). Na sala modelaram-se duas grelhas (85 cm^2) e em cada quarto uma grelha (42.5 cm^2). O programa de simulação numérica calcula o fluxo de admissão de ar com base no diferencial de pressão de referência entre o ar exterior e interior (20 Pa), do coeficiente de descarga que traduz o efeito da viscosidade do fluido e do regime do escoamento (*EnergyPlus*, 2013);
- A pressão do vento nas fachadas é calculada com base nos dados ficheiro climático criado (Capítulo 4.3.2), onde consta o valor da velocidade do vento e a sua direção. Os coeficientes de pressão exteriores e interiores são fatores corretivos dos valores que provêm do ficheiro climático, que dependem da forma da construção, direção e sentido do vento, da existência de aberturas na envolvente do edifício e da sua distribuição. A Figura 4.16 representa os coeficientes de pressão extraídos do Eurocódigo 1 (NP, 2010) para as 4 direções de pressão do vento nas fachadas Nordeste e Sudoeste;

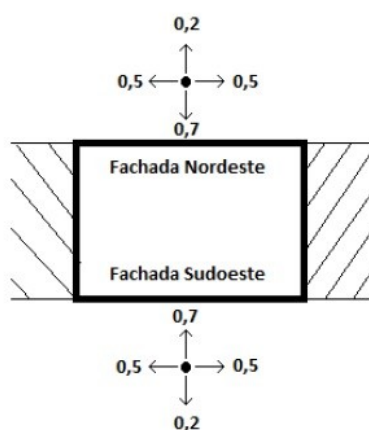


Figura 4.16 – Coeficientes de pressão do vento nas fachadas

- Os equipamentos mecânicos de extração de ar (cozinha e WC) foram modelados considerando que estão a funcionar sempre que a zona térmica estiver a ser utilizada, ou seja, têm horário de funcionamento igual ao da ocupação do compartimento, com caudal de extração de 60 m³/h. Foi considerada uma eficiência energética dos equipamentos de 60 % e um acréscimo de pressão do ar devido a seu funcionamento de 100 Pa (valores aconselhados pelo programa). Quando estão desligados, o programa considera-os como pequenas aberturas e, como tal, existe um fluxo de ar entre o interior e o exterior através das pequenas aberturas existentes, função da diferença de pressão entre o ar interior e o exterior;

- A permeabilidade ao ar de portas e janelas foi modelada com base no tipo de vão (porta ou janela) e o seu estado de abertura (aberto ou fechado). O programa gera automaticamente 4 frinchas em torno do vão criado, com base num valor de permeabilidade atribuído (Melo, *et al.*, 2008). Assume-se no estudo de simulação que as janelas permanecem fechadas com permeabilidade pouco significativa (0.000035 kg/s.m). As portas das zonas térmicas encontram-se fechadas porém permitem trocas de ar entre as zonas térmicas devido a possuírem uma permeabilidade mais elevada (0.0024 kg/s.m).

4.5.6. CARATERIZAÇÃO DOS GANHOS INTERNOS

4.5.6.1. ENQUADRAMENTO

Os ganhos internos englobam os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes, aos dispositivos de iluminação elétrica e aos equipamentos instalados, como televisores, eletrodomésticos, computadores, fogões e equipamentos de produção de água quente sanitária. O calor produzido pelos sistemas de aquecimento do ar ambiente não é considerado como ganho interno (Canha da Piedade, *et al.*, 2009).

Os ocupantes representam uma parcela considerável no valor dos ganhos de calor sensível e latente de um edifício. No Quadro 4.8 são indicadas as taxas de produção de calor do metabolismo humano em função do tipo de atividade desempenhada.

Quadro 4.8 - Ganhos internos de ocupação (adaptado de Canha da Piedade, *et al.*, 2009)

Tipo de Edifício	Ganhos sensíveis (W/m ²)		Ganhos latentes (W/m ²)	
	Médios	Máximos	Médios	Máximos
Residenciais	2	-	2	-

A norma ISO 7730 (ISO, 2005) avalia a taxa metabólica associada a diferentes atividades. Sabendo que a área do corpo é de aproximadamente 1,8 m² é possível estimar o valor da taxa de produção de calor humano para cada tipo de atividade (Quadro 4.9).

Quadro 4.9 - Taxa metabólica para diferentes atividades (adaptado de ISO 7730, 2005)

Atividade	Taxa metabólica (W/m ²)
Deitado	46
Sentado. Relaxado	58
Atividade sedentária (escola, residência, escritório, laboratório)	70
Atividade leve (compras, laboratório, indústria leve)	93
Atividade média (assistente de loja, doméstica, trabalho com máquinas)	116
Caminhada em terreno plano:	
2 Km/h	110
3 Km/h	140
4 Km/h	165
5 Km/h	200

Os dispositivos de iluminação elétrica com lâmpadas fluorescentes (59 % de ganhos radiativos e 41 % de convectivos) acrescem em 20 % os ganhos de calor internos em relação às lâmpadas incandescentes (80% de ganhos radiativos e 20 % de convectivos) (Canha da Piedade, *et al.*, 2009).

Os equipamentos elétricos de uso residencial (70 % de ganhos radiativos e 30 % de convectivos) apresentam ganhos internos de acordo com o especificado no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Ganhos internos de equipamento (adaptado de Canha da Piedade, *et al.*, 2009)

Equipamento	Ganho de calor (W)	Comentário
Televisão	50-100	-
Frigorífico	100-200	Os modelos recentes são mais eficientes
Computador pessoal	50-200	Independente do uso quando ligado
Impressora de agulhas	10-30 em modo "standby"	Aumenta para o dobro durante o uso
Impressora laser	150 em modo "standby"	
scanner	150-300 em modo "standby"	

A dificuldade em traduzir com rigor todas as fontes de ganhos internos determina que, de um modo geral, estes se estimem em função da área útil de pavimento. O valor dos ganhos internos varia de país para país, em função das diferenças de carácter económico, social e cultural, de acordo com o evidenciado no Quadro 4.11, válido para o sector residencial.

Quadro 4.11 - Ganhos internos típicos (adaptado de Canha da Piedade, *et al.*, 2009) *

Nível de Ganhos	Iluminação (W/m ²)	Equipamentos (W/m ²)
Baixo	5	5
Médio	15	10
Alto	25	20
Ocupantes	74.6 W/pessoa	

* - Valores originais extraídos de (RETScreen International, 2001-2005).

4.5.6.2. MODELAÇÃO DOS GANHOS INTERNOS

Foi adotado para o estudo de simulação numérica do Apartamento-Tipo uma modelação dos ganhos internos, diferenciada para a estação de aquecimento e de arrefecimento, onde se destaca:

- Os ganhos internos de ocupação e de iluminação são idênticos para ambos os períodos do ano, contudo os ganhos de equipamento são distintos;
- A observação dos hábitos de utilização do Apartamento-Tipo pelos ocupantes, ao longo de 1 ano de campanha experimental, permite constatar que durante o inverno, a utilização de televisores, computadores e impressora é mais frequente, e com períodos de utilização mais alongados. No verão, em período de férias laborais e escolares, essa utilização é menos frequente e ocorre em períodos de menor duração;
- Existe uma ampla utilização de eletrodomésticos e equipamentos de informática. Destacam-se 3 televisores (Z1, Z3 e Z6), duas aparelhagens de som (Z3 e Z5), 2 computadores pessoais (Z3 e Z5), uma impressora (Z5), frigorífico, arca, fogão e forno, micro-ondas, máquinas de lavar roupa e louça, termoacumulador elétrico (Z4) e de relógios-despertadores (Z1, Z5 e Z6).

A repartição adotada para modelação dos ganhos internos está especificada nos Quadros 4.12 e 4.13.

Quadro 4.12 - Ganhos internos na estação de aquecimento

Zona Térmica/ Compartimento	Ocupantes (#)	Valores adotados para os ganhos internos - inverno				
		Ocupação ⁽¹⁾ (W/ocupante)		Iluminação ⁽²⁾ (W/m ²)	Equipamento ⁽³⁾ (W)	
		Latente	Sensível	Sensível	Latente	Sensível
Z1/Quarto NE	2	63	63	15	0	100
Z2/WC	1	113	13	15	0	0
Z3/Sala	5	63	63	15	0	250
Z4/Cozinha e Lavandaria	5	63	63	15	0	200
Z5/Quarto1 SW	1	63	63	15	0	100
Z6/Quarto2 SW	2	63	63	15	0	150

⁽¹⁾- 126 W/ocupante = 70 W/m² x 1.8 m² - atividade sedentária (ISO, 2005).

⁽²⁾- 15 W/m² de ganhos de calor sensível - nível de ganho médio (RETScreen International, 2001-2005).

⁽³⁾- 13 W/m² de ganhos de calor sensível - nível de ganho médio (RETScreen International, 2001-2005).

Quadro 4.13 - Ganhos internos na estação de arrefecimento

Zona Térmica/ Compartimento	Ocupantes (#)	Valores adotados para os ganhos internos - verão				
		Ocupação ⁽¹⁾ (W/ocupante)		Iluminação ⁽²⁾ (W/m ²)	Equipamento ⁽³⁾ (W)	
		Latente	Sensível	Sensível	Latente	Sensível
Z1/Quarto NE	2	63	63	15	0	50
Z2/WC	1	113	13	15	0	0
Z3/Sala	5	63	63	15	0	100
Z4/Cozinha e Lavandaria	5	63	63	15	0	75
Z5/Quarto1 SW	1	63	63	15	0	50
Z6/Quarto2 SW	2	63	63	15	0	75

⁽¹⁾- 126 W/ocupante = 70 W/m² x 1.8 m² - atividade sedentária (ISO, 2005).

⁽²⁾- 15 W/m² de ganhos de calor sensível - nível de ganho médio (RETScreen International, 2001-2005).

⁽³⁾- 6 W/m² de ganhos de calor sensível - nível de ganho baixo (RETScreen International, 2001-2005).

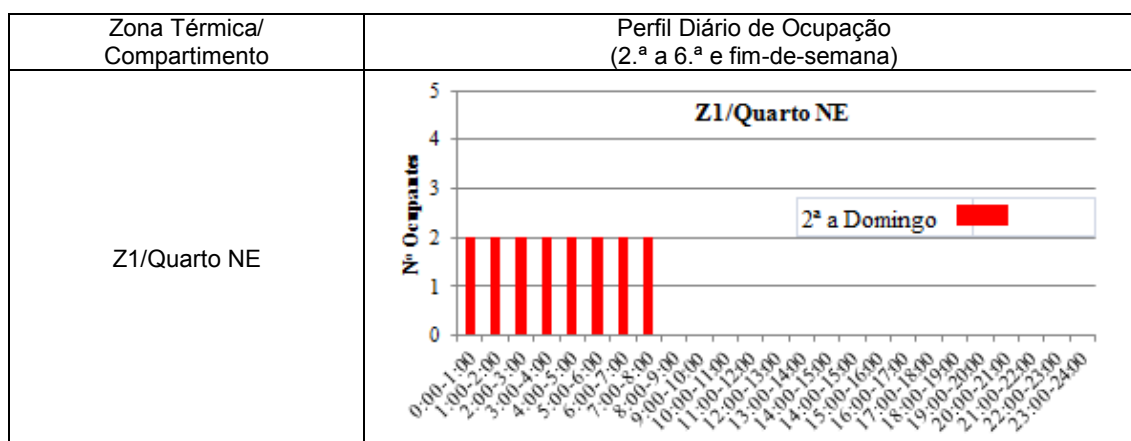
Os ganhos internos de ocupação devido ao metabolismo, iluminação e de equipamento são função do período de ocupação das zonas térmicas. O horário de funcionamento das zonas térmicas encontra-se especificado no Capítulo 4.5.7.

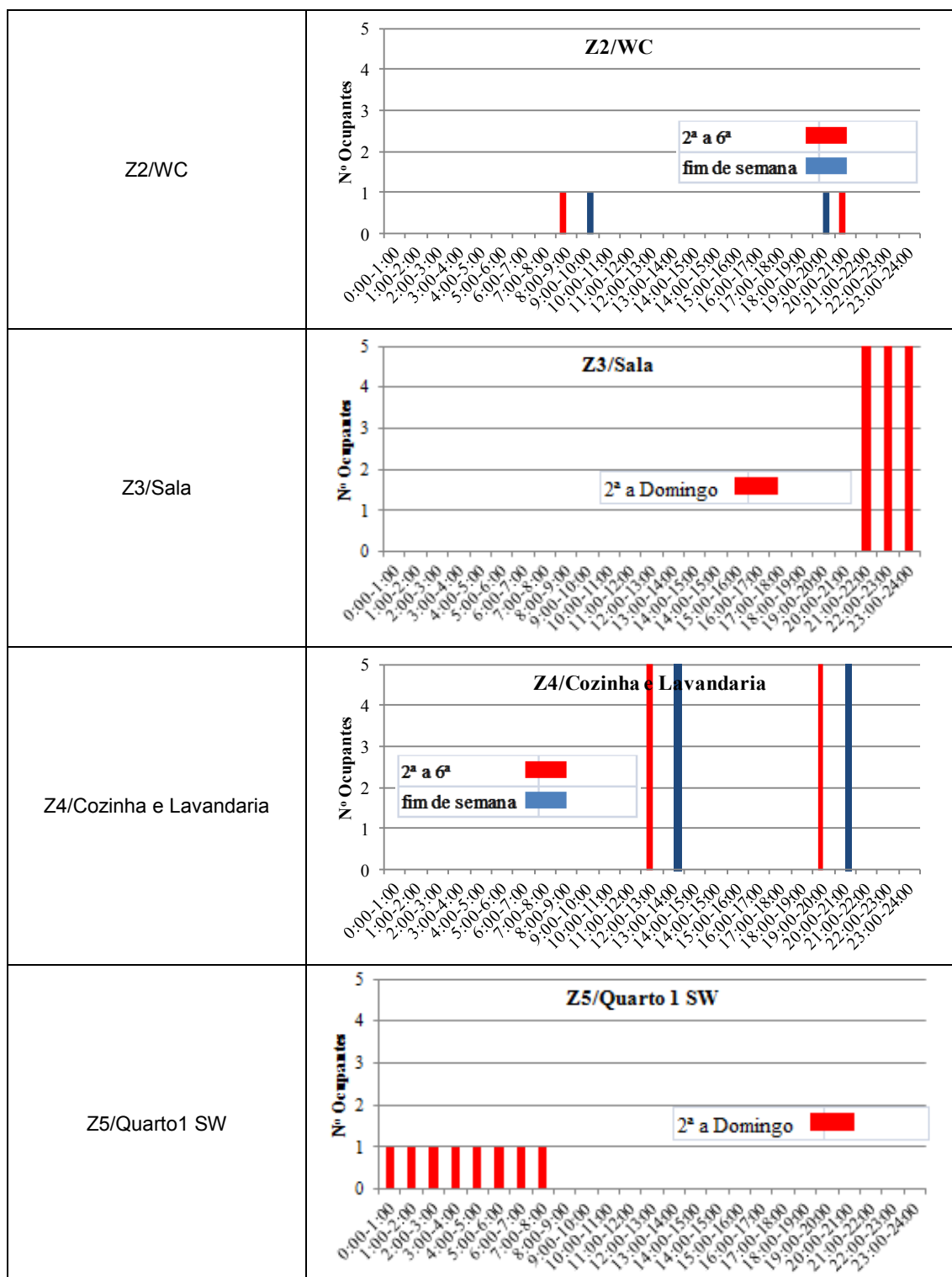
4.5.7. CARATERIZAÇÃO DOS PADRÕES DE UTILIZAÇÃO

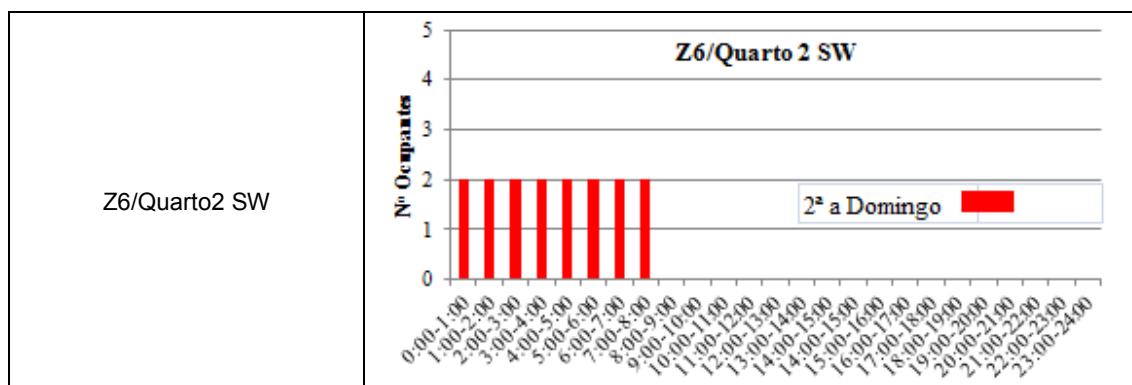
A partir de dados recolhidos com base na observação dos hábitos de utilização do Apartamento-Tipo, e no preenchimento de inquéritos diários distribuídos aos ocupantes, procedeu-se à conceção de perfis diários de ocupação tipo para cada uma das zonas térmicas do modelo e à implementação de padrões de utilização dos sistemas de ventilação de extração, de iluminação e de ativação das proteções solares dos envidraçados.

No Quadro 4.14 resume-se o perfil diário de ocupação das zonas térmicas consideradas no modelo:

Quadro 4.14 - Perfil diário de ocupação

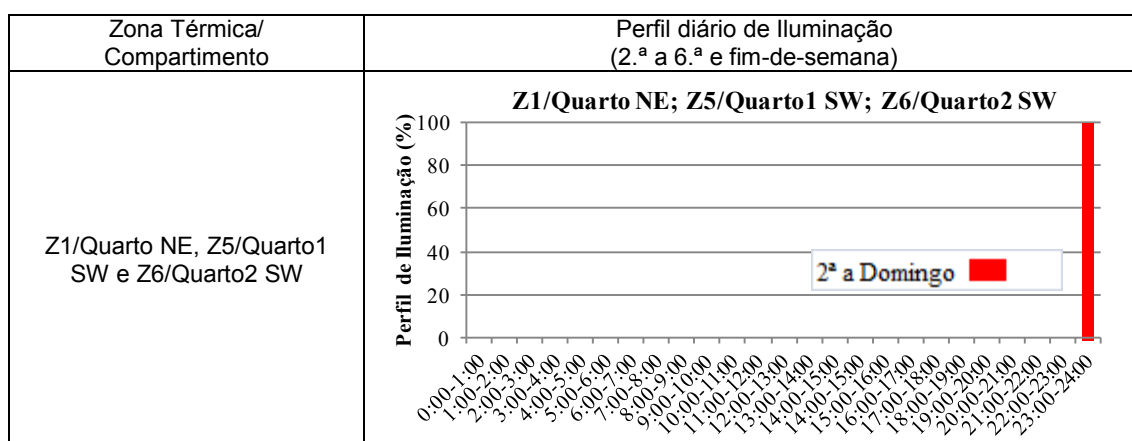






O perfil diário de iluminação é idêntico ao perfil de ocupação para as diversas zonas térmicas (Quadro 4.14), com exceção dos quartos (zonas térmicas Z1, Z5 e Z6). Nos quartos foi adotado o perfil de iluminação representado no Quadro 4.15.

Quadro 4.15 - Perfil diário de iluminação

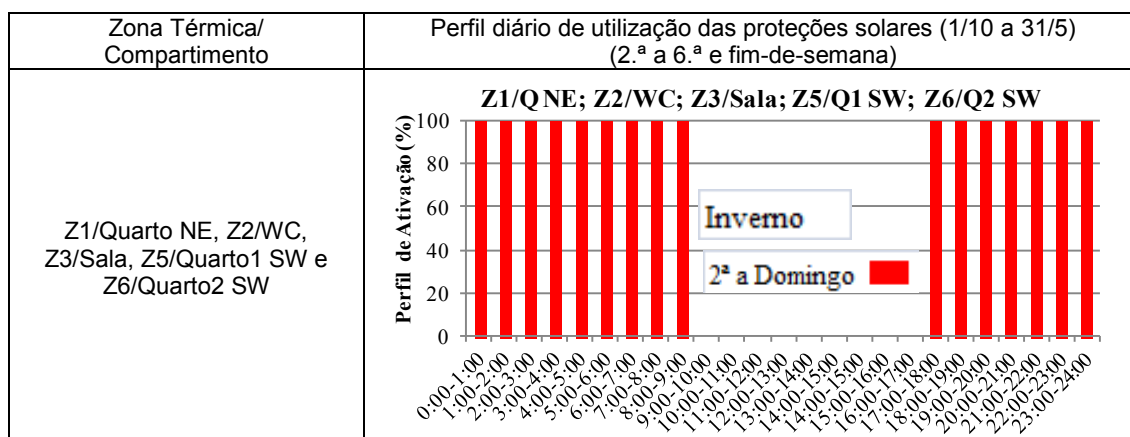


O perfil diário de utilização dos equipamentos é idêntico ao perfil de ocupação para a totalidade das zonas térmicas (Quadros 4.14 e 4.15).

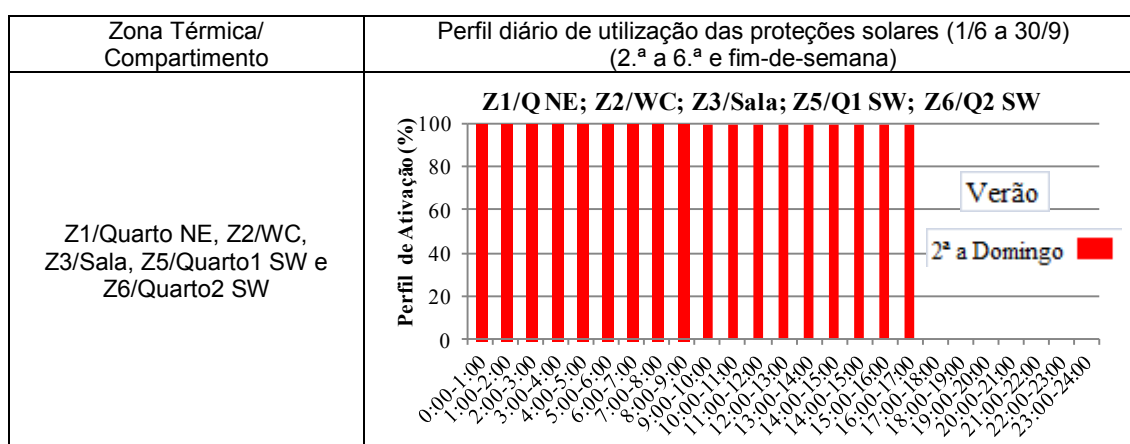
O perfil diário de utilização dos sistemas de extração de ar instalados nas zonas térmicas Z2 (WC) e Z4 (Cozinha e Lavandaria) seguem o perfil de ocupação dos compartimentos (Quadro 4.14).

O perfil diário de ativação das proteções solares é distinto do período de inverno para o de verão (Quadros 4.16 e 4.17).

Quadro 4.16 - Perfil diário de ativação das proteções solares (inverno)



Quadro 4.17 - Perfil diário de ativação das proteções solares (verão)



4.6. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.6.1. INTRODUÇÃO

A aplicação do modelo criado no estudo de sensibilidade (Capítulo 5) pressupõe a sua validação prévia com os resultados de medição apresentados no Capítulo 3.

Dado o elevado nível de detalhe utilizado na conceção do modelo, conforme descrito nos Capítulos 4.3, 4.4 e 4.5 é expectável um ajuste adequado entre os resultados obtidos na simulação e os das medições. O detalhe usado na construção do modelo é evidente no seguinte:

- A definição detalhada dos dados climáticos obrigou à construção de um ficheiro de dados específico com os registos horários das diferentes variáveis meteorológicas (Capítulo 4.3). Os dados climáticos utilizados na simulação foram obtidos pela estação meteorológica do LFC e devidamente validados com medições realizadas *in situ* por um período de 3 meses (Capítulo 3.2.4.4);
- O perfil de ocupação do Apartamento-Tipo utilizado foi definido com base em inquéritos de preenchimento diário, assim como os perfis de iluminação, utilização de equipamento,

acionamento dos sistemas mecânicos de extração de ar e de ativação das proteções solares dos vãos envidraçados.

A validação do modelo de simulação numérica foi conseguida pelo ajuste entre os valores da variação da temperatura do ar interior do modelo e os correspondentes à medição *in situ*. O estudo de validação numérica, desenvolvido em condições de serviço, centra-se na temperatura do ar interior em detrimento da humidade relativa. A simulação detalhada deste parâmetro higrotérmico implicaria a definição exaustiva das características de higroscopicidade dos revestimentos, e das peças de mobiliário e decoração, pelo que se achou prudente centrar o estudo de validação do modelo na temperatura do ar interior. O programa *EnergyPlus* é sobretudo vocacionado para a simulação térmica dos edifícios (Almeida, 2011).

A análise foi centrada em dois períodos considerados representativos do desempenho térmico em condições de serviço: o período de inverno correspondente aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e o período de verão correspondente aos meses de julho, agosto e setembro. Nos períodos de meia estação os valores da temperatura do ar interior estão mais próximos de valores de conforto.

Apesar de se ter simulado a temperatura do ar interior e a humidade relativa das 6 zonas térmicas do Apartamento-Tipo, apresenta-se os resultados relativos a 3 das zonas térmicas representadas: a sala de estar com orientação a Nordeste (Z3), o quarto de casal com orientação a Nordeste (Z1) e o outro quarto de casal com orientação a Sudoeste (Z6). Privilegiou-se o estudo dos compartimentos principais onde a permanência dos ocupantes se faz sentir ao longo de um período de tempo mais alargado.

4.6.2. VARIAÇÃO ANUAL DA TEMPERATURA DO AR

Os gráficos das Figuras 4.17, 4.19 e 4.21 representam, respetivamente, a variação anual da temperatura do ar interior nas zonas térmicas Z1, Z3 e Z6 para os cenários experimental (exp.) e de simulação (sim.). Os gráficos das Figura 4.18, 4.20 e 4.22 representam, para Z1, Z3 e Z6, a variação anual das diferenças de temperatura do ar interior entre os cenários experimental e de simulação.

A observação dos gráficos das Figuras 4.17 e 4.18 permite constatar uma diferença entre o valor anual da temperatura média do ar interior, T_{med} , para os cenários experimental e de simulação, em Z1, de apenas 0.29 °C. A diferença de temperatura entre ambos os cenários flutua, ao longo do ano, dentro de uma faixa relativamente estreita, variável entre - 3 °C e + 3 °C (Figura 4.16). O desvio padrão da amostra dista do valor médio da diferença de temperatura de apenas 0.85 °C. Trata-se de um desvio padrão inferior a 1 °C, o que traduz um ajuste adequado entre os valores da temperatura do ar interior para ambos os cenários.

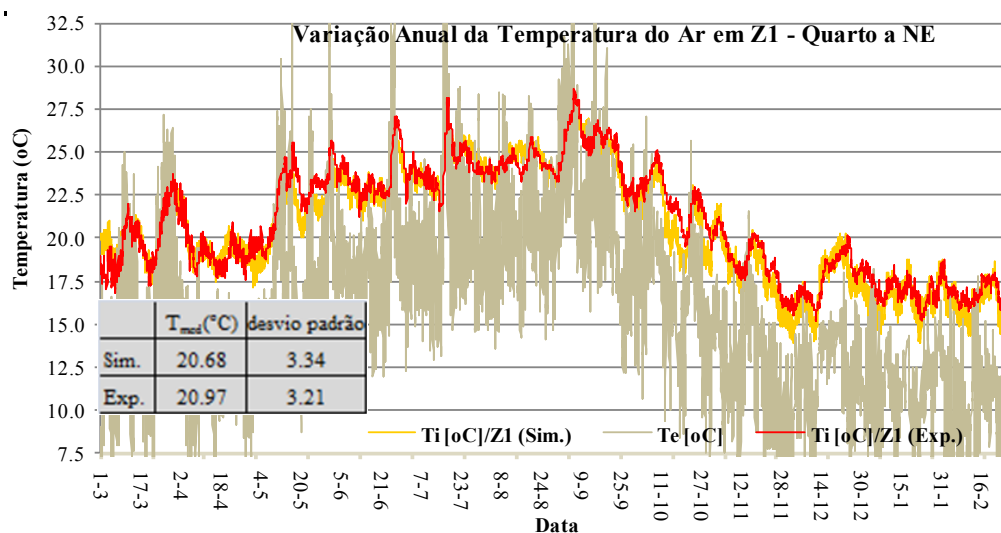


Figura 4.17 – Variação anual da temperatura do ar interior em Z1 (simulação versus experimentação)

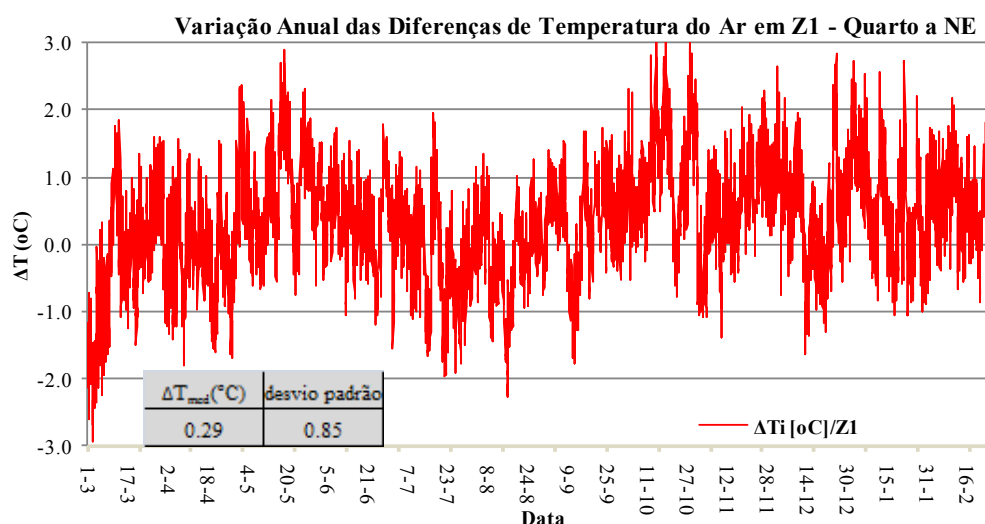


Figura 4.18 – Variação anual da diferença de temperatura do ar em Z1 (simulação versus experimentação)

A observação dos gráficos das Figuras 4.19 e 4.20, permite constatar, em Z3, uma diferença no valor da temperatura do ar entre os cenários experimental e de simulação, de 0.68 °C. Trata-se de uma variação mais expressiva do que a registada em Z1, que é atribuída à ocorrência de períodos pontuais de aquecimento do ar ambiente na sala, que coincidem com períodos festivos, assinalados nas Figuras 4.19 e 4.20 com a letra “A” (período de Natal e Ano Novo). O cenário relativo a “picos” de aquecimento em Z3 foi descrito e interpretado no Capítulo 3.3.2.2.

A diferença de temperatura entre ambos os cenários flutua ao longo do ano, em Z3, dentro de uma gama de variação de – 3 °C a + 5 °C (Figura 4.20). O desvio padrão da amostra é de 1.02 °C, o que revela uma maior dispersão de valores em torno da média, do que o registado para Z1. Trata-se, no entanto, de um valor próximo de 1 °C, que não compromete o ajuste entre as curvas da temperatura do ar interior para os cenários experimental e de simulação.

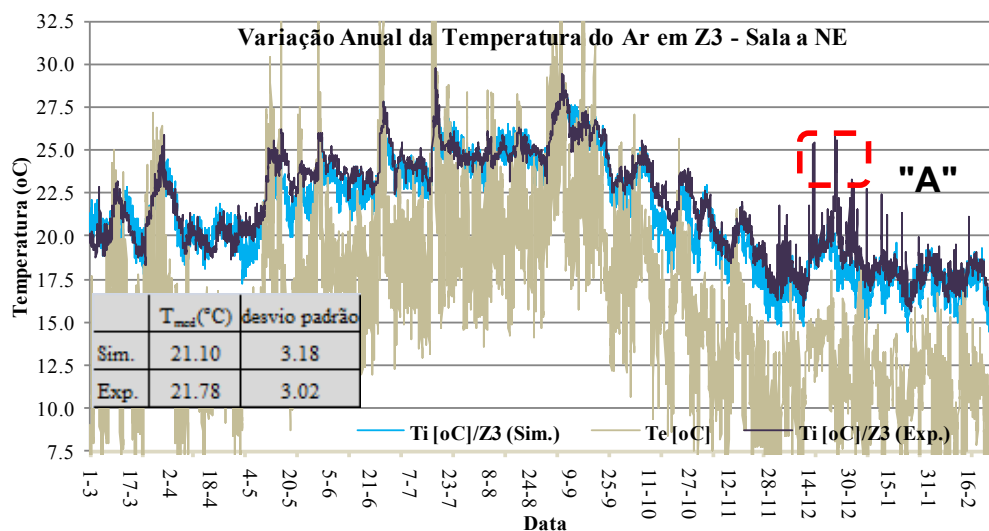


Figura 4.19 – Variação anual da temperatura do ar interior em Z3 (simulação versus experimentação)

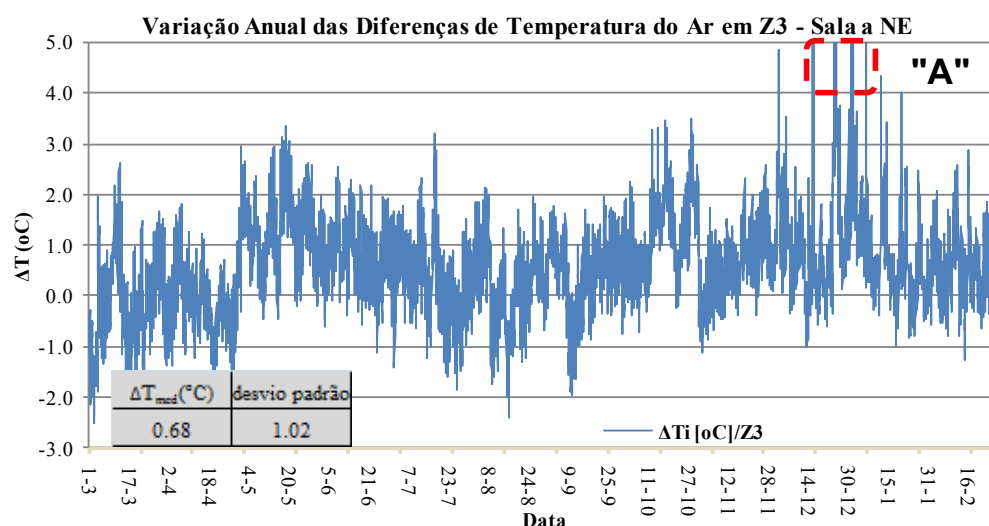


Figura 4.20 – Variação anual da diferença da temperatura do ar em Z3 (simulação versus experimentação)

À semelhança do destacado para Z1, a observação dos gráficos das Figuras 4.21 e 4.22 permite observar uma diferença no valor anual da temperatura média do ar interior, T_{med} , entre os cenários experimental e de simulação, em Z6, de apenas 0.26 °C. Tal como para Z1, o valor da diferença de temperatura entre ambos os cenários, flutua ao longo do ano dentro de uma gama variável entre - 3 °C e + 3 °C (Figura 4.22). O desvio padrão da amostra é de 0.88 °C, o que não compromete o ajuste entre curvas para ambos os cenários.

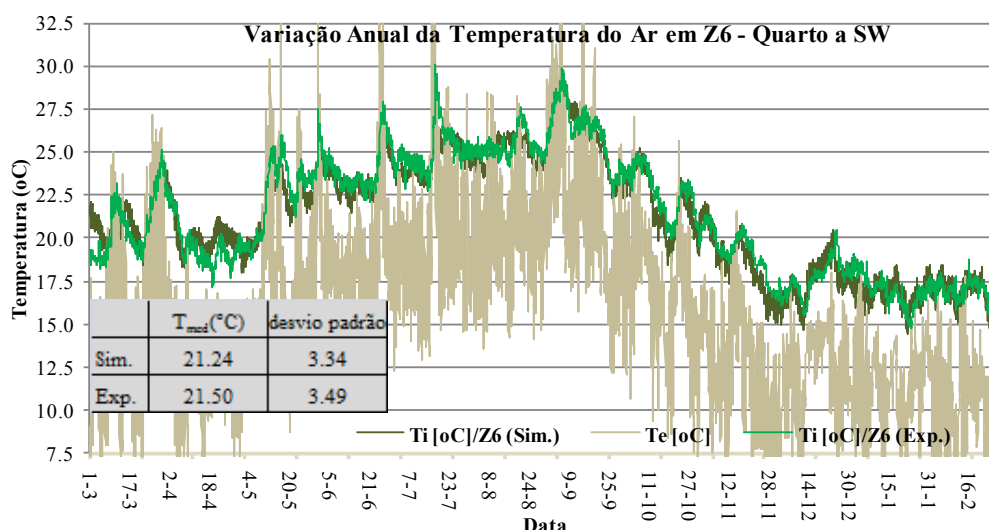


Figura 4.21 – Variação anual da temperatura do ar interior em Z6 (simulação versus experimentação)

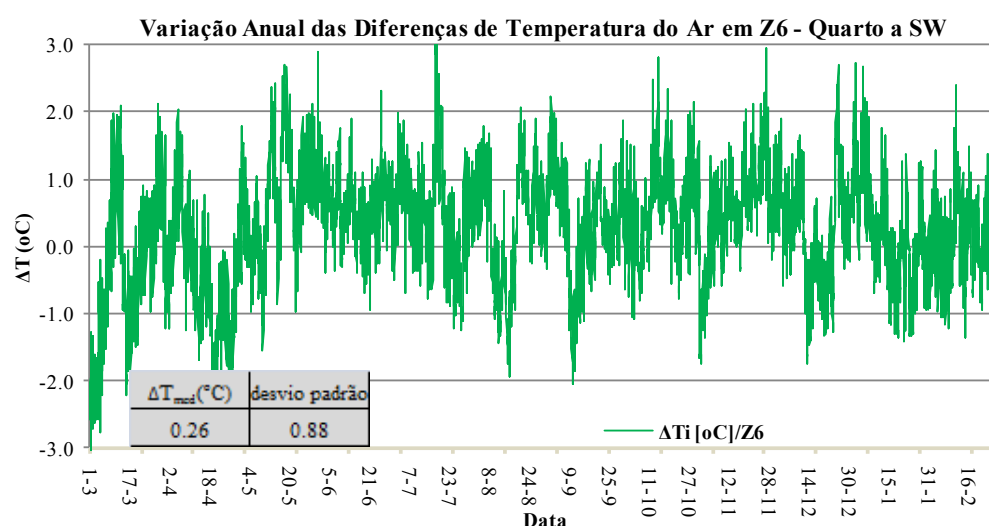


Figura 4.22 – Variação anual da diferença da temperatura do ar em Z6 (simulação versus experimentação)

4.6.3. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NO INVERNO (DEZEMBRO 2012, JANEIRO E FEVEREIRO 2013)

O estudo de validação do modelo deve permitir uma análise mais detalhada dos resultados do que a proporcionada pela sua análise anual (Capítulo 4.6.2). Para tal, procurou-se detalhar o estudo num período de tempo mais curto, correspondente a 3 meses típicos da estação de aquecimento (dezembro de 2012, janeiro e fevereiro de 2013). O gráfico da Figura 4.23 representa o valor da temperatura média do ar interior nas zonas térmicas Z1, Z3 e Z6, nos meses de dezembro de 2012, janeiro e fevereiro de 2013, para os cenários experimental e de simulação. A análise do gráfico da Figura 4.23, complementada pelos resultados apresentados no Quadro 4.18, permite constatar o seguinte:

- O valor da temperatura média do ar interior, T_{med} , é bastante idêntico para os cenários experimental e de simulação, nas zonas térmicas Z1 (Quarto a NE) e Z6 (Quarto a SW), para os 3 meses de inverno. A diferença máxima não ultrapassa 0.16 °C para Z1 em janeiro, e - 0.15 °C para Z6 em fevereiro;
- O valor da temperatura média do ar interior, T_{med} , difere para ambos os cenários na zona térmica Z3 (Sala a NE). A diferença entre os cenários experimental e de simulação é sobretudo

evidente nos meses de dezembro (1.01 °C) e de janeiro (0.85 °C). Essa diferença é explicada pela utilização pontual de aquecimento do ar ambiente, situação que não foi considerada no estudo de validação do modelo de simulação implementado;

- O registo “A” destaca o acréscimo do valor médio da temperatura do ar no mês de dezembro. Este acréscimo deve-se sobretudo à utilização de aquecimento do ar ambiente na semana do Natal (24/12 a 31/12/2012), de acordo com o descrito no Capítulo 3.4.2.2.

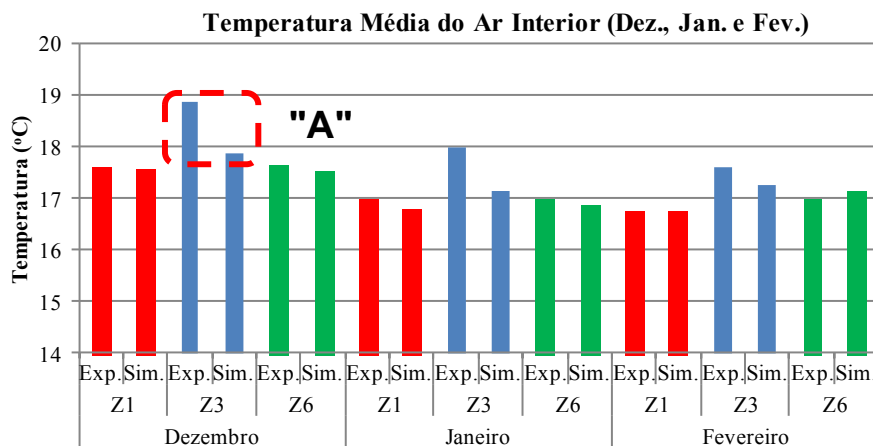


Figura 4.23 – Comparação entre a temperatura média do ar em Z1, Z3 e Z6 (simulação versus experimentação)

No Quadro 4.18 estão representados os valores médios, máximos e mínimos da temperatura do ar nas zonas térmicas Z1, Z3 e Z6, para os cenários experimental e de simulação, nos meses de dezembro de 2012, janeiro e fevereiro de 2013, bem como as respetivas diferenças. Da análise dos resultados destaca-se:

- Em Z1, a diferença entre o valor da temperatura máxima do ar interior, ΔT_{max} , para ambos os cenários, não excede 0.37 °C e entre o valor mínimo, ΔT_{min} , não excede - 0.24 °C (ambos em dezembro 2012). Trata-se de diferenças bastante reduzidas que não comprometem a validade do modelo;
- Em Z6, a diferença entre o valor da temperatura máxima do ar interior, ΔT_{max} , para os 2 cenários é mais elevada em janeiro (0.84 °C) e entre o valor da temperatura mínima do ar interior, ΔT_{min} , é maior em fevereiro (0.51 °C). As diferenças, muito embora superiores às registadas em Z1, são ainda assim bastante reduzidas;
- Em Z3, a diferença entre o valor da temperatura máxima do ar interior, ΔT_{max} , para os 2 cenários é mais elevada em dezembro (5.52 °C) e entre o valor da temperatura mínima, ΔT_{min} é maior em fevereiro (0.33 °C). Sublinha-se que a diferença entre o valor da temperatura mínima, ΔT_{min} , é muito baixa, contudo a diferença referente ao valor máximo tem alguma expressão, que se deve à existência de aquecimento do ar ambiente na semana de Natal.

Quadro 4.18 - Estudo dos valores médios, máximos e mínimos para o inverno (simulação versus experimentação)

Zona Térmica	Mês	Resultado	Indicador Estatístico					
			T_{med} (°C)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	ΔT_{med} (°C)	ΔT_{max} (°C)	ΔT_{min} (°C)
Z1	Dez.	Experimental	17.60	20.22	15.15	0.02	0.37	-0.24
		Simulação	17.58	19.85	15.39			
	Jan.	Experimental	16.98	18.72	15.22	0.16	0.28	0.06
		Simulação	16.81	18.44	15.16			
	Fev.	Experimental	16.76	18.79	14.91	-0.01	0.17	0.11
		Simulação	16.77	18.62	14.80			
Z3	Dez.	Experimental	18.88	25.84	15.89	1.01	5.52	-0.02
		Simulação	17.87	20.32	15.91			
	Jan.	Experimental	18.01	23.16	15.58	0.85	4.02	0.07
		Simulação	17.16	19.14	15.51			
	Fev.	Experimental	17.61	21.22	15.68	0.36	2.00	0.33
		Simulação	17.25	19.22	15.35			
Z6	Dez.	Experimental	17.63	20.56	15.44	0.09	0.76	-0.32
		Simulação	17.54	19.79	15.76			
	Jan.	Experimental	16.99	19.13	14.72	0.13	0.84	-0.39
		Simulação	16.86	18.29	15.11			
	Fev.	Experimental	16.99	18.99	15.63	-0.15	0.54	0.51
		Simulação	17.14	18.45	15.12			

Os gráficos das Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 representam as curvas de frequências acumuladas da temperatura do ar interior nas zonas térmicas Z1, Z3 e Z6, para os cenários experimental e de simulação, no mês de dezembro de 2012. Nos gráficos indicados encontra-se marcada a temperatura mínima de conforto (18°C) para edifícios da Categoria III, à luz da EN 15251 (CEN, 2007). Os gráficos referentes aos meses de janeiro e fevereiro de 2013 são apresentados no Anexo III da Tese.

A Figura 4.24 evidencia um traçado muito aproximado entre as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior em Z1 (Quarto a NE), para os cenários experimental e de simulação. As diferenças entre os percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90 são, respectivamente, de - 0.29 °C, 0.08 °C e 0.39 °C. São valores bastante reduzidos que traduzem um bom ajuste das curvas. A temperatura limite de conforto referente à Categoria III da EN 15251 (CEN, 2007) é de 18 °C. Em 54.4 % do total de horas do mês de dezembro, para o cenário experimental, não se atinge a referida temperatura. Esse valor é de 65.1 % para o cenário de simulação, o que traduz uma aproximação adequada entre ambos os cenários (apenas 10.7 % de diferença).

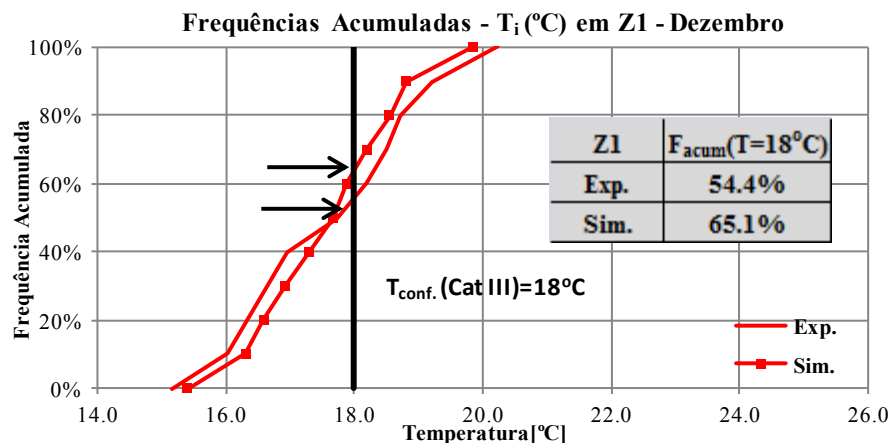


Figura 4.24 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z1 (simulação versus experimentação)

Ao invés da zona térmica Z1 (Figura 4.24), o gráfico da Figura 4.25 apresenta um traçado divergente das curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior em Z3 (Sala a NE), para os cenários experimental e de simulação. As diferenças entre os percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90 são, respectivamente, de 0.18 °C, 0.87 °C e 1.79 °C. O crescimento dos valores do percentil 10 para o percentil 90 põe em evidência a referida divergência entre curvas. Em 33.2 % do total de horas do mês de dezembro, para o cenário experimental, não se atinge a temperatura correspondente ao limite de conforto de 18 °C. Esse valor é de 48.1 % para o cenário de simulação. A diferença de 14.9 % entre cenários, revela que a aproximação das curvas não é tão conseguida quanto a obtida para Z1.

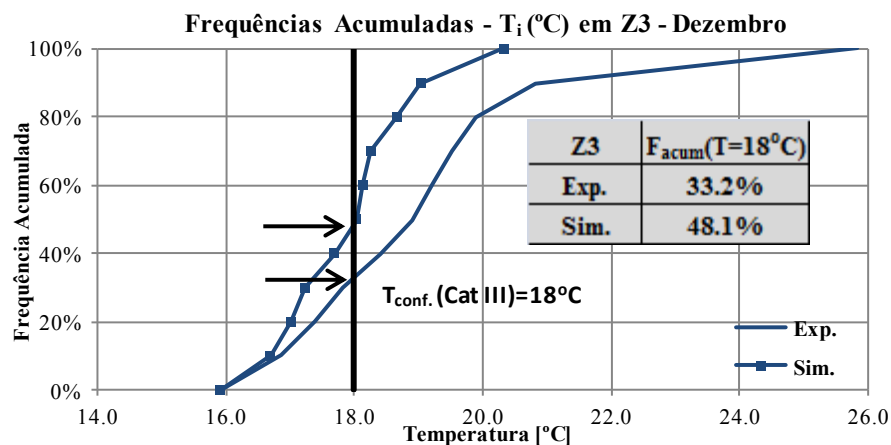


Figura 4.25 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z3 (simulação versus experimentação)

De forma idêntica a Z1, a Figura 4.26 evidencia um traçado muito ajustado entre as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior em Z3 (Quarto a SW), para os cenários experimental e de simulação. As diferenças entre os percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90 são, respectivamente, de -0.28 °C, 0.25 °C e 0.46 °C. Os valores substancialmente reduzidos evidenciam um ajuste adequado entre ambas as curvas. Em 65.3 % do total de horas do mês de dezembro, para o cenário experimental, não se atinge a temperatura correspondente ao limite de conforto de 18 °C. Esse valor é de 73.2 % para o cenário de simulação, o que revela uma aproximação adequada entre cenários (apenas 7.9 % de diferença).

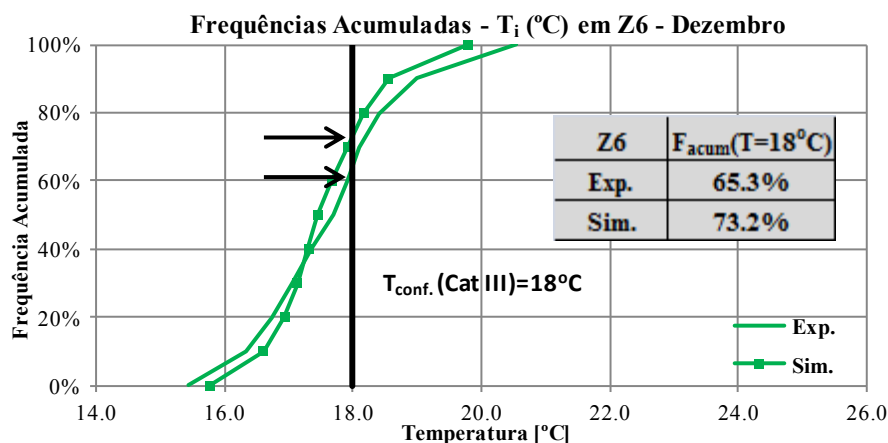


Figura 4.26 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z6 (simulação versus experimentação)

O estudo das frequências acumuladas para os 3 meses de inverno, representado no Quadro 4.19, permite extrair as seguintes conclusões:

- A diferença entre o percentil 10 das frequências acumuladas de temperatura do ar interior, para os cenários experimental e de simulação, apresenta valores bastante reduzidos para as 3 zonas térmicas. Destacam-se para os 3 meses de inverno, valores que não ultrapassam - 0.29 °C para Z1 (dezembro), 0.31 °C para Z3 (fevereiro) e - 0.36 °C para Z6 (janeiro);
- A diferença entre o percentil 50 de frequências acumuladas (mediana) é igualmente reduzida. Apresenta um valor máximo de 0.15 °C para Z1 (janeiro), de 0.87 °C para Z3 (dezembro) e de 0.25 °C para Z6 (dezembro). O valor referente a Z3, em dezembro, é mais elevado do que os restantes, devido à utilização de aquecimento do ar ambiente no período do Natal;
- Para o percentil 90 de frequências acumuladas, o valor da diferença entre os cenários experimental e de simulação, é reduzido para Z1 e Z6 (0.39 °C e 0.72 °C, respetivamente), contudo atinge um valor máximo de 1.79 °C para Z3, no mês de dezembro. Este acréscimo deve-se à existência de “picos” no valor da temperatura do ar interior em Z3, motivados pelo aquecimento do ar ambiente;
- A análise dos percentis de frequência acumulada da temperatura do ar interior e suas respetivas diferenças, permite concluir que para a generalidade dos percentis observados, existe uma proximidade entre o valor da temperatura do ar para os cenários experimental e de simulação, ao longo dos 3 meses de inverno, nas 3 zonas térmicas analisadas (Z1, Z3 e Z6).

Quadro 4.19 - Estudo das frequências acumuladas para o inverno (simulação versus experimentação)

Zona Térmica	Mês	Resultado	Indicador Estatístico					
			T_{10} (°C)	T_{90} (°C)	T_{50} (°C)	ΔT_{10} (°C)	ΔT_{90} (°C)	ΔT_{50} (°C)
Z1	Dez.	Experimental	16.01	19.20	17.74	-0.29	0.39	0.08
		Simulação	16.30	18.80	17.66			
	Jan.	Experimental	16.01	17.89	16.99	-0.02	0.29	0.15
		Simulação	16.03	17.60	16.84			
	Fev.	Experimental	15.84	17.75	16.73	0.11	0.00	-0.09
		Simulação	15.74	17.75	16.81			
Z3	Dez.	Experimental	16.87	20.82	18.89	0.18	1.79	0.87
		Simulação	16.69	19.03	18.02			
	Jan.	Experimental	16.68	19.18	17.89	0.29	1.30	0.70
		Simulação	16.38	17.88	17.19			
	Fev.	Experimental	16.56	18.60	17.58	0.31	0.55	0.23
		Simulação	16.25	18.06	17.35			
Z6	Dez.	Experimental	16.32	19.01	17.70	-0.28	0.46	0.25
		Simulação	16.60	18.55	17.45			
	Jan.	Experimental	15.68	18.30	16.99	-0.36	0.72	0.08
		Simulação	16.04	17.57	16.91			
	Fev.	Experimental	16.25	17.61	17.06	0.19	-0.33	-0.18
		Simulação	16.06	17.94	17.23			

4.6.4. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NO VERÃO (JULHO, AGOSTO E SETEMBRO 2012)

Para validação do modelo de simulação no verão foi desenvolvido, à semelhança do inverno (Capítulo 4.6.3), o estudo da variação da temperatura do ar num período correspondente aos 3 meses típicos da estação de arrefecimento (julho, agosto e setembro de 2012). O gráfico da Figura 4.27 representa o valor médio da temperatura do ar interior nas zonas térmicas Z1, Z3 e Z6, nos meses de julho, agosto e setembro de 2012, para os cenários experimental e de simulação. A análise do gráfico da Figura 4.27, complementada pelos resultados apresentados no Quadro 4.20, permite constatar o seguinte:

- O valor da temperatura média do ar interior, T_{med} , é idêntico para os cenários experimental e de simulação, nas 3 zonas térmicas, para meses de verão. A diferença máxima não ultrapassa em nenhuma das circunstâncias os 0.6 °C. Destacam-se, como diferenças máximas, um valor de -0.58 °C para Z1 em agosto, 0.49 °C para Z3 em setembro e 0.55 °C para Z6 em julho;
- O valor da temperatura média do ar interior, T_{med} , nas 3 zonas térmicas é mais elevado em setembro, do que em julho e agosto. O mês de setembro de 2012 foi um mês particularmente quente, no Porto, com um registo do valor médio horário da temperatura do ar exterior igual a 21.1 °C (18.6 °C em julho e 19.8 °C em agosto de 2012).

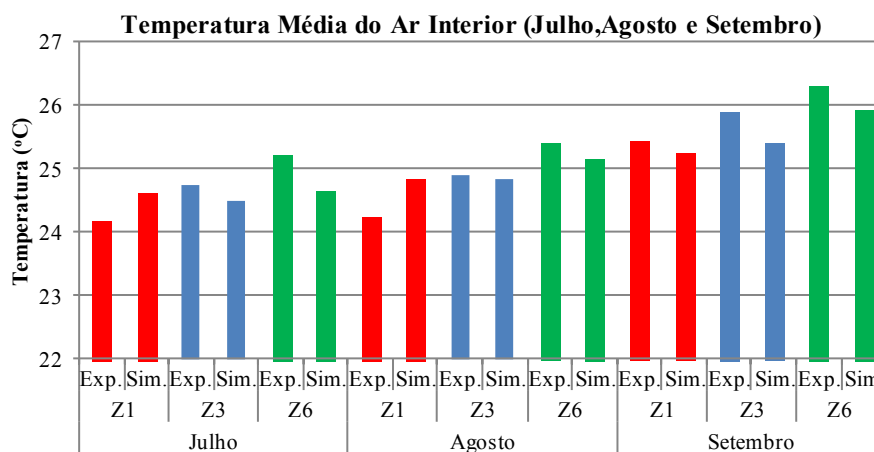


Figura 4.27 – Comparação entre a temperatura média em Z1, Z3 e Z6 (simulação versus experimentação)

No Quadro 4.20 estão representados os valores médios, máximos e mínimos da temperatura do ar nas zonas térmicas Z1, Z3 e Z6, para os cenários experimental e de simulação, nos meses de julho, agosto e setembro de 2012, bem como as respectivas diferenças. Da análise dos resultados destaca-se:

- Em Z1, a diferença entre o valor da temperatura máxima do ar interior, ΔT_{max} , para ambos os cenários é de 1.73°C e entre o valor mínimo, ΔT_{min} , de -1.17°C . Ambos os valores foram registados em julho de 2012. Muito embora se tratem de diferenças superiores a 1°C , os valores em causa são extremos que não comprometem a validade do modelo;
- Em Z3, a diferença entre o valor da temperatura máxima do ar interior, ΔT_{max} , é obtida em julho (2.60°C) e entre o valor mínimo, ΔT_{min} , em agosto (-0.55°C). A diferença entre o valor mínimo é reduzida, contudo a diferença referente ao valor máximo tem uma expressão considerável, no entanto, tal como para Z1, pode ser relativizada por constituir um valor extremo;
- Em Z6, a análise das diferenças da temperatura do ar é similar à desenvolvida para Z3. A diferença entre o valor mínimo é desprezável (0.47°C em agosto de 2012), contudo a diferença referente ao valor máximo atinge 3.61°C (julho de 2012). Por motivo similar ao apontado para Z1 e Z3, a relevância deste valor extremo é baixa.

Quadro 4.20 - Estudo dos valores médios, máximos e mínimos para o verão (simulação versus experimentação)

Zona Térmica	Mês	Resultado	Indicador Estatístico					
			T _{med} (°C)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	ΔT_{med}	ΔT_{max}	$\Delta T_{mín}$ (°C)
Z1	Jul.	Experimental	24.18	28.12	21.51	-0.43	1.73	-1.17
		Simulação	24.61	26.39	22.68			
	Ago.	Experimental	24.25	25.91	23.09	-0.58	-0.31	-0.26
		Simulação	24.83	26.22	23.35			
	Set.	Experimental	25.44	28.67	21.53	0.21	1.47	-0.42
		Simulação	25.23	27.19	21.95			
Z3	Jul.	Experimental	24.73	29.72	22.30	0.23	2.60	-0.29
		Simulação	24.50	27.11	22.59			
	Ago.	Experimental	24.89	26.26	22.80	0.06	-0.59	-0.55
		Simulação	24.83	26.85	23.35			
	Set.	Experimental	25.89	29.46	22.37	0.49	1.12	0.26
		Simulação	25.40	28.35	22.11			
Z6	Jul.	Experimental	25.20	30.12	22.59	0.55	3.61	-0.28
		Simulação	24.65	26.51	22.87			
	Ago.	Experimental	25.40	27.68	24.15	0.24	1.10	0.47
		Simulação	25.16	26.58	23.68			
	Set.	Experimental	26.30	29.84	22.44	0.38	1.43	-0.01
		Simulação	25.92	28.41	22.45			

Os gráficos das Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 representam as curvas de frequências acumuladas da temperatura do ar interior nas zonas térmicas Z1, Z3 e Z6, para os cenários experimental e de simulação, no mês de agosto de 2012. Nos gráficos indicados encontra-se marcada a temperatura limite de conforto (27 °C) para edifícios da Categoria III, de acordo com o especificado na EN 15251 (CEN, 2007). Os gráficos referentes aos meses de julho e de setembro de 2012 são apresentados no Anexo III da Tese.

As curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior em Z1 (Quarto a NE), para os cenários experimental e de simulação, representadas na Figura 4.28, são paralelas entre si, o que traduz uma igual tendência na variação da temperatura do ar para os 2 cenários. As diferenças entre os percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90 são, respetivamente, de - 0.59 °C, - 0.57 °C e - 0.12 °C. São valores reduzidos que destacam um ajuste razoável entre curvas. Para a totalidade das horas do mês de agosto, tanto para o cenário experimental como para o cenário de simulação, a temperatura do ar interior fica aquém do limite de conforto de 27 °C, valor de referência para a Categoria III da EN 15251 (CEN, 2007).

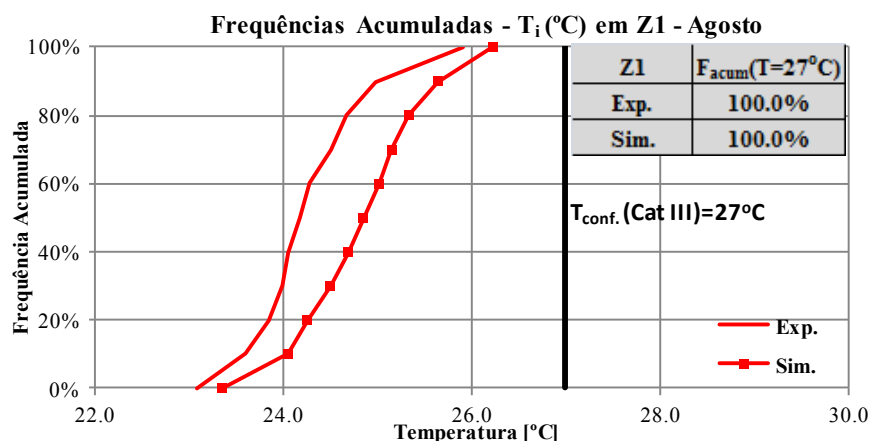


Figura 4.28 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z1 (simulação versus experimentação)

O gráfico da Figura 4.29 representa as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior em Z3 (Sala a NE), para os cenários experimental e de simulação, no mês de agosto. O traçado das curvas é praticamente sobreposto, o que denota um ajuste quase perfeito entre estas. As diferenças entre os percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90 são respectivamente, de 0.40 °C, 0.00 °C e 0.08 °C. Tal como em Z1, durante todo o mês de agosto, tanto para o cenário experimental como para o cenário de simulação, a temperatura do ar interior fica aquém do limite de conforto de 27 °C, valor indicado como limite de admissibilidade para a Categoria III da EN 15251 (CEN, 2007).

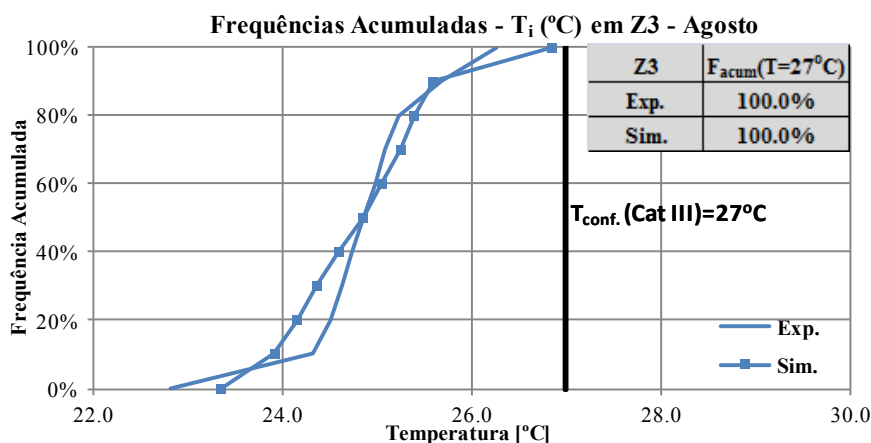


Figura 4.29 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z3 (simulação versus experimentação)

O gráfico da Figura 4.30 representa as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior em Z6 (Quarto a SW), para os cenários experimental e de simulação, no mês de agosto. As curvas cruzam-se na mediana, divergindo de forma pouco acentuada nos percentis extremos. As diferenças entre os percentis de frequência acumulada 10, 50 e 90 são, respectivamente, de 0.54 °C, - 0.01 °C e 0.34 °C, valores que traduzem um ajuste aproximado das curvas. Para o cenário experimental, em 95.6 % do total de horas do mês de agosto, a temperatura do ar em Z6 fica aquém do limite de conforto de 27 °C para a Categoria III. Para o cenário de simulação esse valor atinge 100 % do total de horas.

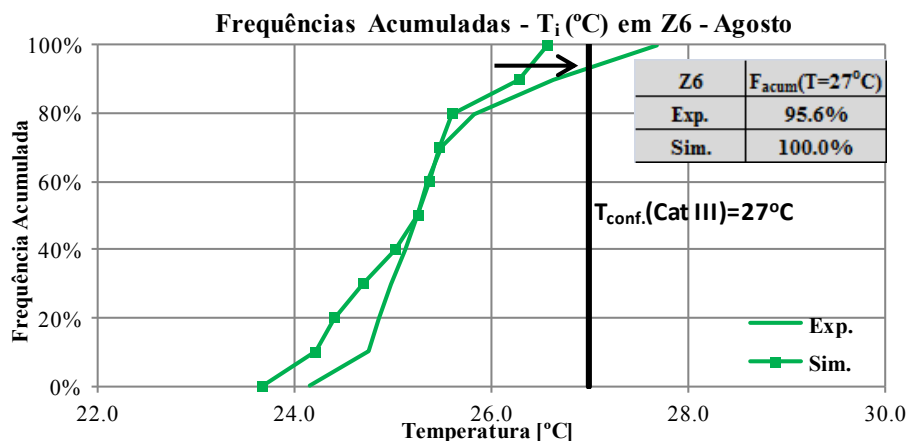


Figura 4.30 – Curva de frequências acumuladas da temperatura em Z6 (simulação versus experimentação)

O estudo das frequências acumuladas para os 3 meses de verão, representado no Quadro 4.21 permite extrair as seguintes conclusões:

- A diferença entre o percentil 10 das frequências acumuladas de temperatura do ar é reduzida para as 3 zonas térmicas. Destacam-se para os 3 meses em análise, valores que não ultrapassam -0.59°C para Z1 (julho), 0.40°C para Z3 (agosto) e 0.54°C para Z6 (agosto);
- A diferença entre o percentil 50 de frequências acumuladas (mediana) é igualmente reduzida. Apresenta um valor máximo de -0.68°C para Z1 (agosto), de 0.37°C para Z3 (setembro) e de 0.29°C para Z6 (julho);
- A diferença entre o percentil 90 de frequências acumuladas da temperatura do ar é igualmente reduzida, para as 3 zonas térmicas, não ultrapassando um valor de -0.67°C para Z1 (agosto), de 0.78°C para Z3 (setembro) e de 0.88°C para Z6 (julho);
- A análise dos percentis de frequência acumulada da temperatura do ar interior e suas respectivas diferenças, permite concluir que para a generalidade dos percentis observados, existe uma proximidade entre o valor da temperatura do ar para os cenários experimental e de simulação, ao longo dos 3 meses de verão, nas 3 zonas térmicas analisadas (Z1, Z2 e Z3).

Quadro 4.21 - Estudo das frequências acumuladas para o verão (simulação versus experimentação)

Zona Térmica	Mês	Resultado	Indicador Estatístico					
			T_{10} (°C)	T_{90} (°C)	T_{50} (°C)	ΔT_{10} (°C)	ΔT_{90} (°C)	ΔT_{50} (°C)
Z1	Jul.	Experimental	22.87	25.67	23.93	-0.59	-0.12	-0.57
		Simulação	23.46	25.79	24.50			
	Ago.	Experimental	23.59	24.97	24.17	-0.46	-0.67	-0.68
		Simulação	24.05	25.64	24.85			
	Set.	Experimental	22.87	27.19	25.74	-0.23	0.56	0.23
		Simulação	23.11	26.62	25.51			
Z3	Jul.	Experimental	23.59	25.96	24.51	0.32	0.22	-0.03
		Simulação	23.27	25.74	24.54			
	Ago.	Experimental	24.32	25.67	24.85	0.40	0.08	0.00
		Simulação	23.91	25.59	24.85			
	Set.	Experimental	23.33	27.75	26.06	0.34	0.78	0.37
		Simulação	22.99	26.97	25.69			
Z6	Jul.	Experimental	23.81	26.94	24.87	0.41	0.88	0.29
		Simulação	23.40	26.06	24.58			
	Ago.	Experimental	24.75	26.62	25.25	0.54	0.34	-0.01
		Simulação	24.21	26.28	25.25			
	Set.	Experimental	23.52	28.44	26.50	0.21	0.78	0.28
		Simulação	23.31	27.66	26.22			

4.7. CONCLUSÕES

A simulação numérica em regime dinâmico do desempenho anual do Apartamento-Tipo constituiu um procedimento complexo e demorado, que requereu a criação de um modelo detalhado para traduzir o comportamento térmico do apartamento simulado. Para realização das simulações foi construído um ficheiro climático com dados reais. Após definição da geometria do modelo, foi necessário definir de forma exaustiva as propriedades dos elementos construtivos, detalhar de forma completa os sistemas de ventilação, quantificar de forma detalhada os ganhos internos e definir de forma minuciosa os padrões de utilização do apartamento. O programa *EnergyPlus* permitiu implementar o modelo com o grau de detalhe definido para o efeito, muito embora o tempo de simulação necessário tenha crescido com o aumento da complexidade do modelo criado.

O modelo criado foi posteriormente validado com os resultados da campanha experimental descrita no Capítulo 3 da Tese. A validação do modelo foi uma tarefa complexa, dado ter sido necessário modelar previamente um conjunto diverso de variáveis, para se conseguir o ajuste entre os resultados das medições e os resultados da simulação numérica. O trabalho de validação numérica do modelo de simulação criado permite estabelecer as seguintes conclusões:

- 1) A implementação do estudo de simulação numérica foi desenvolvida com o programa *EnergyPlus*. Trata-se de uma ferramenta credível (Topping, *et al.*, 2011; Crawley, *et al.*, 2008), apta para avaliar o conforto térmico de um apartamento sem sistemas de aquecimento e de arrefecimento instalados, em regime dinâmico, num cenário de livre flutuação da temperatura do ar interior;
- 2) Para validação do modelo de simulação numérica foi utilizado um ficheiro climático com dados meteorológicos reais, construído a partir dos dados climáticos da estação meteorológica do LFC. O estudo de validação foi desenvolvido de 1 de março de 2012 a 28 de fevereiro de

2013, pelo que foi necessário trabalhar com os dados meteorológicos referentes a esse período temporal, em detrimento dos dados considerados típicos para um período de 30 anos, conforme constam do ficheiro *TMY* do *EnergyPlus*;

3) A construção de um modelo geométrico simplificado permitiu reduzir consideravelmente o tempo de simulação numérica, tornando o processo computacionalmente menos exigente e demorado;

4) A caracterização detalhada das variáveis necessárias à implementação do modelo permitiu a obtenção de um modelo de simulação numérica mais fiável, e como tal mais apto a garantir um ajuste adequado entre os resultados obtidos na simulação e os das medições;

5) A validação do modelo foi centrada, tanto no estudo da variação anual da temperatura do ar interior, como no estudo da sua variação em períodos de tempo mais reduzidos, no inverno e no verão;

6) Não foi considerado para efeitos de validação do modelo, o estudo da variação da humidade relativa do ar interior. As características de higroscopicidade dos materiais não foram devidamente caracterizadas, pelo que os resultados obtidos pelo modelo não são suficientemente fiáveis. De acordo com Liesen e Pedersen (1999) este problema prende-se, essencialmente, com o facto de o programa recorrer a um algoritmo iterativo que não é o mais adequado para a previsão dinâmica da transferência de humidade, pois trata-se de um fenómeno não-linear (Rode & Grau, 2003). Considera-se, no entanto, que essa lacuna não é impeditiva da utilização do programa *EnergyPlus*, uma vez que a simulação da humidade relativa não é determinante para o objetivo de validação do modelo;

7) O estudo da variação anual da temperatura do ar interior em Z1, Z3 e Z6, para os cenários experimental e de simulação, permite observar uma diferença entre o valor médio anual de apenas 0.29 °C, em Z1, de 0.68 °C em Z3 e de 0.26 °C em Z6. O desvio padrão da amostra é inferior a 1°C para as 3 zonas térmicas, o que traduz um ajuste adequado entre os valores da temperatura do ar interior para os cenários experimental e de simulação;

8) O estudo da variação da temperatura do ar interior em Z1, Z3 e Z6, nos meses de dezembro 2012, janeiro e fevereiro de 2013, para o cenário experimental e de simulação, permite observar uma diferença inferior a 1 °C para Z1 e Z6. Em Z3, a diferença no valor máximo excede os 5 °C devido à existência de aquecimento do ar ambiente na semana de Natal. Esta diferença, apesar de mais acentuada, é muito pontual pelo que não compromete o estudo de validação do modelo;

9) O estudo da variação da temperatura do ar interior em Z1, Z3 e Z6, nos meses de julho, agosto e setembro de 2012, para o cenário experimental e de simulação, permite observar uma diferença entre o valor máximo da temperatura do ar de 1.73 °C em Z1, 2.60 °C em Z3 e de 3.61 °C em Z6. Muito embora se tratem de diferenças superiores a 1 °C, os valores em causa são extremos máximos, pelo que não comprometem a validade do modelo;

10) Em face do exposto nos pontos 1) a 9) foi conseguida a validação do modelo de simulação numérica da Tese. Esta validação permitirá desenvolver estudos de sensibilidade para um conjunto de cenários de simulação, em 4 localizações geográficas representativas do território nacional, para avaliação do conforto térmico e da eficiência energética (Capítulo 5).

5

INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO NO CONFORTO E NA ENERGIA – ESTUDO DE SENSIBILIDADE

5.1. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Na sequência do estudo de validação do modelo de simulação numérica, em regime dinâmico, do Apartamento-Tipo representativo do Bairro de Lordelo (Capítulo 4) foi desenvolvido um estudo de sensibilidade para um conjunto diverso de cenários, com recurso à simulação numérica, em 4 localizações geográficas representativas do território nacional. O estudo de sensibilidade visa avaliar o conforto térmico e a eficiência energética dos cenários selecionados, os quais traduzem um conjunto de estratégias de reabilitação, conforme explicitado em 5.2. Pretende-se, após realização do estudo, estabelecer uma análise comparativa das estratégias de reabilitação estudadas e proceder à representação gráfica no mapa de Portugal, de um conjunto de indicadores de avaliação do desempenho térmico de inverno e de verão, e do consumo energético de aquecimento e de arrefecimento.

O estudo de sensibilidade tem por base a seguinte metodologia:

- Foram definidos 72 cenários de simulação obtidos pela combinação de 5 parâmetros que traduzem características diversas da envolvente opaca e envidraçada e dos sistemas de ventilação;
- Foram executadas simulações numéricas para os 72 cenários definidos e tendo como base de análise os resultados obtidos, procedeu-se à seleção de um conjunto mais reduzido de cenários de simulação definidos como cenários condicionantes (7 cenários). Os 7 cenários condicionantes são os considerados representativos do 72 inicialmente definidos. Aos cenários condicionantes foram adicionados os cenários “PreReab” e “PosReab” que traduzem o desempenho do Apartamento-Tipo numa fase anterior e posterior à reabilitação;
- Foram executadas simulações numéricas de um conjunto mais reduzido de cenários de simulação (apenas 4) para as 4 localizações geográficas representativas do território nacional (Porto, Lisboa, Bragança e Faro). Os cenários selecionados para desenvolver o estudo alargado de simulação numérica foram os cenários “Melhor” e “Pior”, aos quais correspondem o melhor e o pior desempenho térmico, respetivamente, e os cenários “PreReab” e “PosReab”;

- Foi desenvolvido o estudo do conforto térmico de inverno e de verão dos 4 cenários selecionados, à luz do modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007), das curvas de frequência acumulada e dos valores máximo e mínimo da temperatura do ar interior, T_i ;
- Foi calculada a energia de aquecimento e de arrefecimento necessária à obtenção do conforto térmico à luz das Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007) para os 4 cenários de simulação numérica selecionados, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional;
- Foi desenvolvido um estudo comparativo do desempenho térmico e do consumo energético dos cenários selecionados e efetuada a representação gráfica dos indicadores de desempenho no mapa de Portugal. A representação gráfica dos resultados permitiu avaliar a influência das estratégias de reabilitação traduzidas pelos cenários de simulação estudados, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo.

5.2. SELEÇÃO DOS CENÁRIOS CRÍTICOS

5.2.1. PARÂMETROS CONSIDERADOS

O desenvolvimento do estudo de sensibilidade assentou na construção prévia de uma grelha de análise dos cenários de simulação, a qual traduz um conjunto alargado de estratégias de reabilitação do Apartamento-Tipo. As estratégias de reabilitação analisadas passam pelo reforço da resistência térmica da fachada opaca e da cobertura, da resistência térmica dos vãos envidraçados e das suas características de proteção solar, e pela adoção de cenários de ventilação distintos.

Os cenários de simulação são obtidos por combinação de 5 parâmetros considerados no estudo (Quadro 5.1). Os parâmetros a combinar são os seguintes: coeficiente de transmissão térmica, U , da fachada opaca, da cobertura e dos envidraçados, fator solar, g_{\perp} , dos envidraçados e taxa de renovação horária, RPH , do apartamento.

Quadro 5.1 - Parâmetros considerados nos cenários de simulação e respetivos valores

Parâmetro Valor Adotado	U_{opaco}^1 (W/m ² .°C)	U_{cob}^2 (W/m ² .°C)	U_{wdn}^3 (W/m ² .°C)	g_{\perp}^4 (-)	RPH^5 (h ⁻¹)
1º	$0.6U_{ref}$	$0.6U_{ref}$	U_{ref}	g_{\perp} (com proteção solar ativada)	0.6
2º	U_{Ref}	U_{Ref}	$U_{vidro\ simples}$	$g_{\perp v}$ (sem proteção solar ativada)	1
3º	$U_{sem\ Isol}$	$U_{sem\ Isol}$	-	-	-

^{1,2,3} – O valor do parâmetro, U_{ref} , considerado para a fachada opaca, cobertura e envidraçados é o referente à zona climática I_2 (Porto). Optou-se por uma zona climática I_2 pois conduz a valores de referência intermédios (RCCTE, 2006). O valor do parâmetro, $U_{sem\ Isol}$, corresponde ao valor do coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo sem isolamento térmico aplicado.

³ - O valor do parâmetro, U_{wdn} , corresponde ao coeficiente de transmissão médio dia-noite do vão envidraçado que consta do ITE50 (Pina dos Santos, *et al.*, 2006). O valor do parâmetro, $U_{vidro\ simples}$, corresponde ao valor do coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado constituído por vidro simples aplicado em caixilharia metálica de correr, com dispositivo de oclusão noturna com permeabilidade ao ar baixa, de acordo com o ITE50 (Pina dos Santos, *et al.*, 2006).

⁴ - O valor do parâmetro, g_{\perp} , corresponde ao fator solar do vão envidraçado composto por vidro incolor, para duas situações distintas: com a proteção solar ativada a 100%, g_{\perp} e sem a proteção solar ativada, $g_{\perp v}$. O valor

referente à proteção solar ativada a 100 % considera o efeito de uma persiana exterior em régua metálica de cor clara e o referente à proteção solar desativada considera a aplicação de cortinas interiores transparentes de cor clara (RCCTE, 2006).

⁵ – O valor do parâmetro RPH corresponde à taxa de renovação de ar para duas situações distintas: 0.6 e 1.0 h^{-1} . No período do ano entre 1 de junho a 30 de setembro considera-se adicionalmente o efeito da ventilação noturna, entre as 0 e as 8 horas, com um valor de RPH de 5 h^{-1} .

5.2.2. ESQUEMA EM ÁRVORE

A construção de um esquema em árvore que articulasse os diversos cenários de simulação conduziu à obtenção de uma grelha de análise delineada na Figura 5.1. A combinação entre os parâmetros considerados no estudo sensibilidade conduziu à obtenção de um conjunto de 72 cenários de simulação. Os valores indicados na Figura 5.1 correspondem à concretização dos parâmetros especificados no Quadro 5.1 para os valores de U_{ref} relativos a zona climática I₂ (Porto) e para valores de g_{\perp} extraídos do RCCTE (RCCTE, 2006) relativos a vidro duplo e a vidro simples incolor.

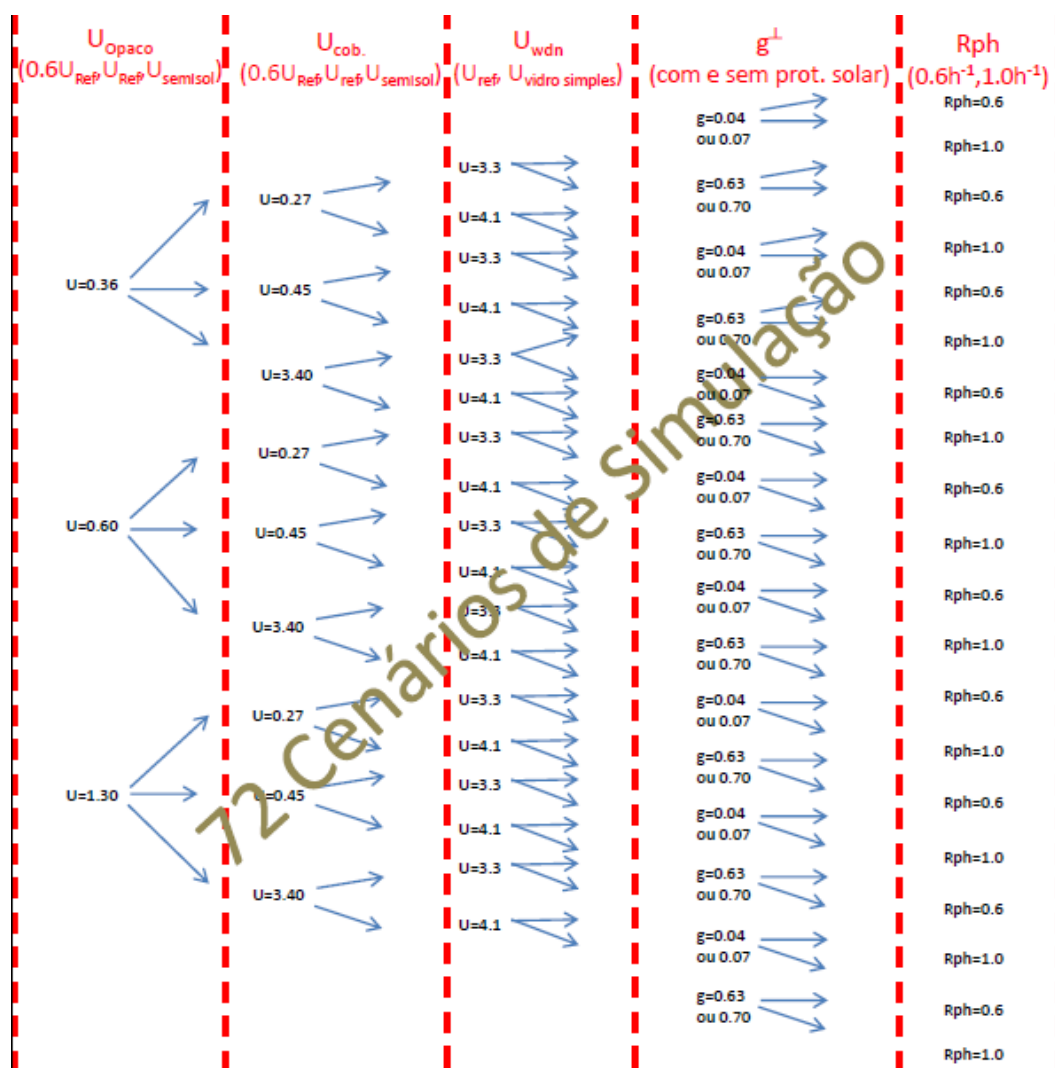


Figura 5.1 – Esquema em árvore para estudo de sensibilidade – zona climática I₂

5.2.3. CENÁRIOS CONDICIONANTES

Foram estudados os 72 cenários de simulação numérica que constam do esquema em árvore da Figura 5.1 e na sequência da análise dos resultados obtidos, foi selecionado um conjunto de 7 cenários designados por cenários condicionantes. Os 7 cenários designados por condicionantes são os cenários cujos resultados de simulação numérica são representativos da grelha. Os resultados destes cenários são muito próximos dos de um conjunto de outros cenários que lhes são adjacentes, pelo que se tornam representativos da grelha. Deste modo, esta amostra de 7 cenários caracteriza de forma homogênea os 72 que constituem a grelha inicial. Os 7 cenários estudados estão identificados na Figura 5.2 para a cidade do Porto.

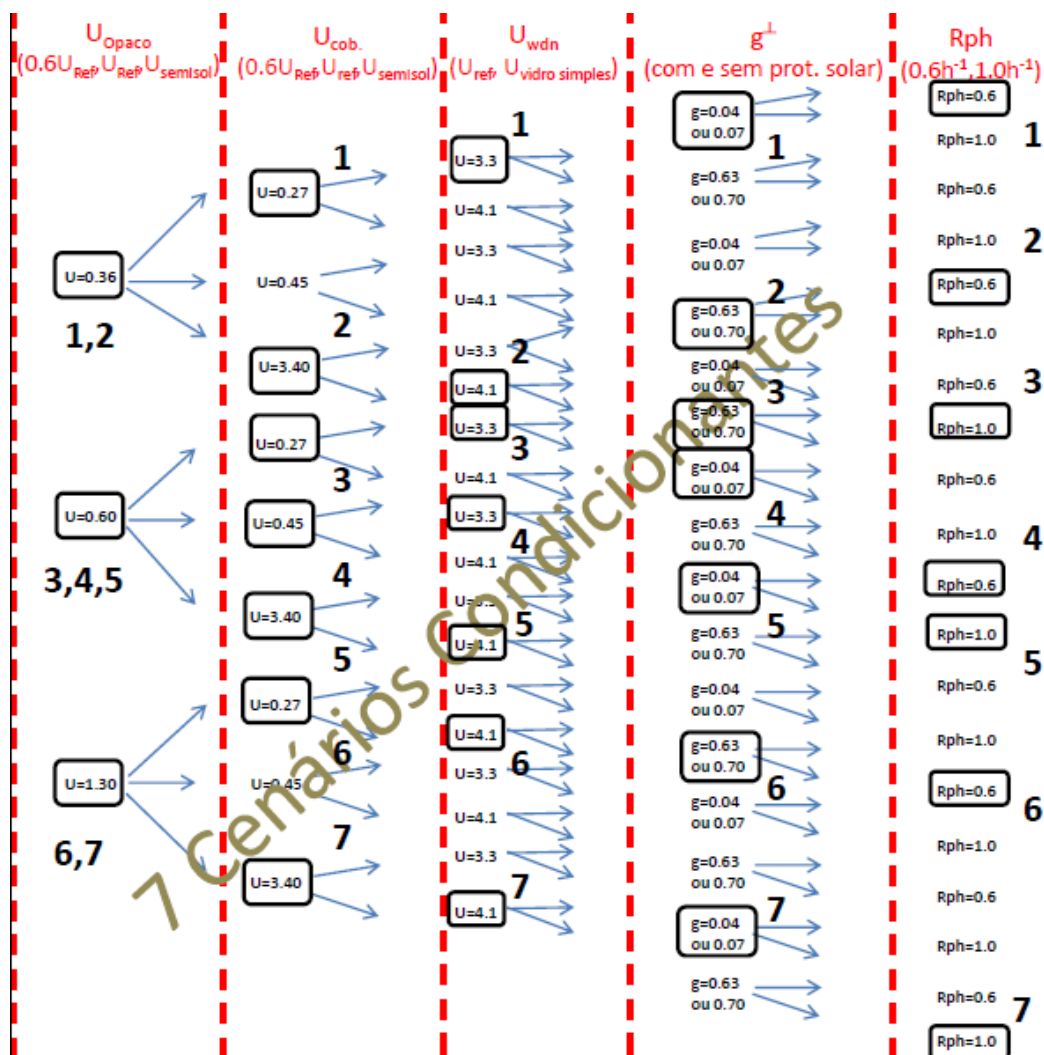


Figura 5.2 – Identificação dos cenários condicionantes no esquema em árvore

O valor dos parâmetros adotados para os estudos de simulação no Porto, consta do Quadro 5.2. Neste Quadro incluem-se 2 cenários adicionais, os cenários pré-reabilitação e pós-reabilitação. O cenário pré-reabilitação (“PreReab”) caracteriza o Apartamento-Tipo numa fase anterior à obra de reabilitação de que foi alvo e o cenário pós-reabilitação (“PosReab”) caracteriza-o após as beneficiações introduzidas. A introdução dos 2 cenários adicionais tem como objetivo poder avaliar os benefícios da ação de reabilitação introduzida, comparando-a com os resultados obtidos no estudo de simulação numérica dos 7 cenários condicionantes.

Quadro 5.2 - Valor dos parâmetros para os 7 cenários condicionantes (zona climática I₂)

Cenário	U_{opaco} (W/m ² .°C)	U_{cob} (W/m ² .°C)	U_{wdn} (W/m ² .°C)	g_{\perp} (-)	RPH (h ⁻¹)
1	0.36	0.27	3.3	0.63	0.6
2	0.36	3.40	4.1	0.63	0.6
3	0.60	0.27	3.3	0.04	1
4	0.60	0.45	3.3	0.63	0.6
5	0.60	3.40	4.1	0.07	1
6	1.30	0.27	4.1	0.70	0.6
7	1.30	3.40	4.1	0.07	1
PosReab ⁶	1.30	0.45	2.8/3.0/4.8	0.63/0.04	Conforme modelo (Cap.4)
PreReab ⁷	1.30	3.40	3.4/5.1	0.70/0.07	Conforme modelo (Cap.4)

⁶ – Para os cenários “PosReab” e “PreReab” os parâmetros U_{wdn} , g_{\perp} e RPH apresentam valores distintos. Para o cenário “PosReab” o valor de U_{wdn} é distinto para o vão envidraçado da sala (2.8 W/m².°C), do dos quartos e WC (3.0W/m².°C) e do da lavandaria (4.8 W/m².°C). Para o cenário “PreReab” o valor de U_{wdn} é distinto para o vão envidraçado da sala e dos quartos (3.4 W/m².°C), do WC e lavandaria (5.1 W/m².°C). Para ambos os cenários o valor de g_{\perp} é distinto para proteção solar ativada (0.04) e proteção solar desativada (0.63). O valor de RPH para os 2 cenários é obtido tendo como base o modelo de validação do sistema de ventilação tratado no Capítulo 4.5.5.3.

Os gráficos das Figuras 5.3 e 5.4 representam a variação da temperatura do ar interior em Z6 (Quarto a SW) para os 6.7 meses da estação de aquecimento (1/10 a 20/4), e para os 4 meses da estação de arrefecimento (1/6 a 30/9), no Porto, para os 7 cenários condicionantes, incluindo os 2 cenários adicionais (“PreReab” e “PosReab”).

A observação do gráfico da Figura 5.3 permite constatar uma diferença acentuada no valor da temperatura do ar interior para os cenários considerados. O cenário que conduz a um valor mais elevado da temperatura média do ar interior, T_{med} , para a estação de aquecimento, é o Cenário 1 (T_{med} = 23.99 °C), enquanto o cenário com o valor mais baixo da temperatura é o cenário 7 (T_{med} = 16.16 °C). A diferença entre ambos os cenários é de 7.83 °C. A temperatura média do ar interior para os cenários “PreReab” e “PosReab” é, respetivamente, de 18.05 °C e 20.01 °C.

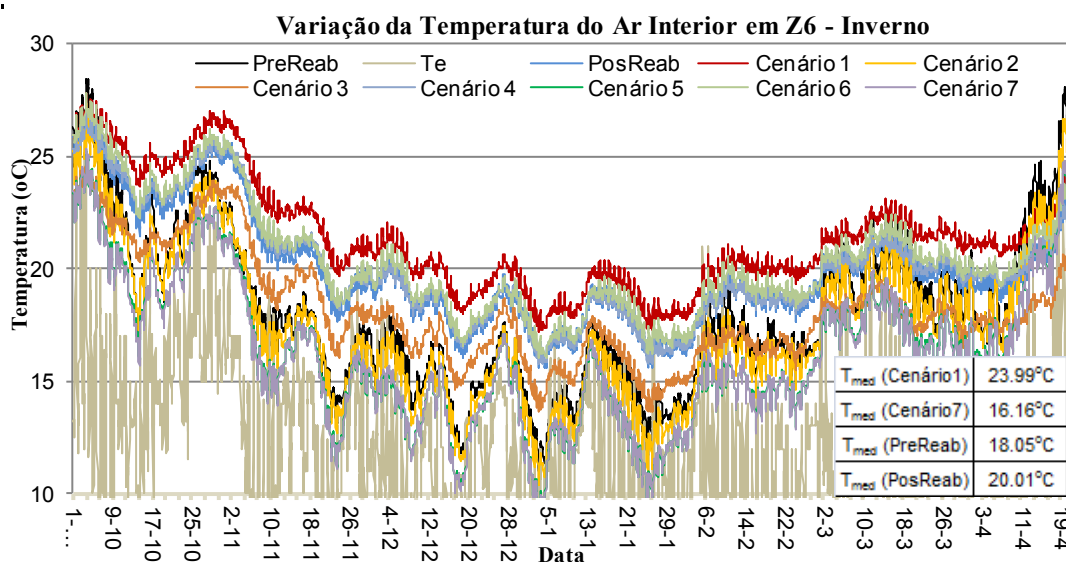


Figura 5.3 – Análise para os 7 cenários condicionantes, incluindo os cenários PosReab e PreReab (inverno)

Uma análise similar para a estação de arrefecimento (Figura 5.4) permite observar um valor máximo da temperatura média do ar interior, para o cenário 2, de 29.32 °C, e um valor mínimo, para o cenário 3, de 23.68 °C. A diferença entre ambos os cenários é de 5.64 °C. A temperatura média do ar interior para os cenários “PreReab” e “PosReab” é, respetivamente, de 28.05 °C e 23.91 °C.

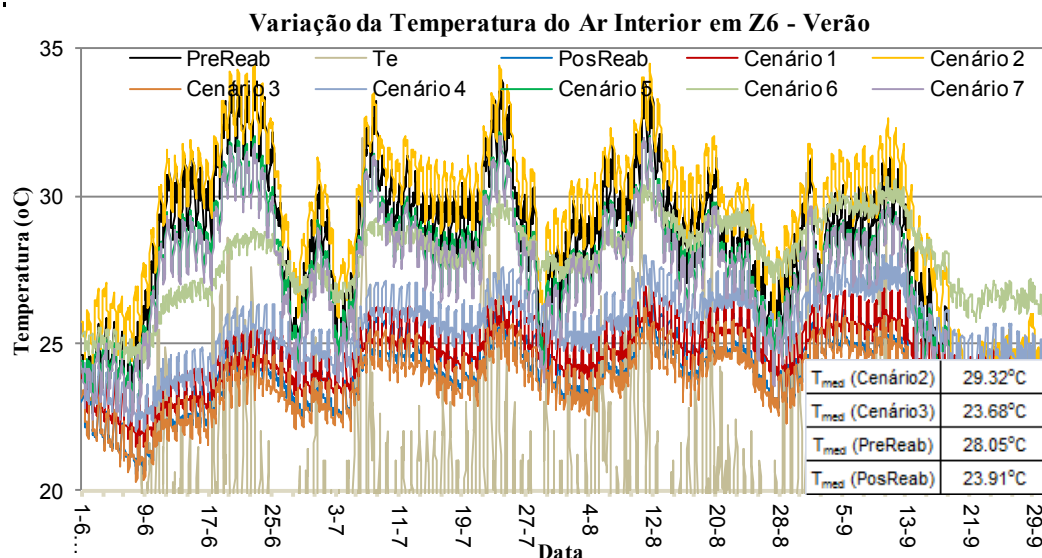


Figura 5.4 – Análise para os 7 cenários condicionantes, incluindo os cenários PosReab e PreReab (Verão)

A análise dos resultados de variação da temperatura do ar interior, T_i , permite observar a existência de um espectro alargado de valores para os 7 cenários considerados condicionantes, com uma gama de variação próxima de 8 °C, para o inverno, e de 6 °C, para o verão. A dispersão dos valores obtidos permite concluir que os 7 cenários condicionantes são representativos do conjunto de 72 cenários definidos inicialmente, por conduzirem a resultados que abrangem uma gama de valores de temperatura do ar interior, T_i , bastante alargada, traduzindo, pela abrangência dos resultados, as diversas estratégias de reabilitação.

5.2.4. CENÁRIOS SELECIONADOS

A realização de estudos de simulação numérica de modelos complexos, com simulações independentes para o inverno e para o verão, é um procedimento demorado e exigente em termos computacionais. Para simplificar o processo de simulação computacional desenvolvido foram selecionados 4 cenários de simulação numérica, estudados nos 4 locais representativos do território nacional.

O estudo dos cenários condicionantes desenvolvido no Capítulo 5.2.3 permitiu identificar os cenários que conduziam aos valores mais elevado e mais reduzido da temperatura média do ar interior, T_{med} , tanto para o inverno como para o verão, nas 4 localizações geográficas ensaiadas. Os cenários 1 e 7 do Quadro 5.2 conduzem, para o inverno, respetivamente, aos valores mais elevado e mais reduzido da temperatura média do ar interior, enquanto os cenários 2 e 3 (Quadro 5.2) conduzem, para o verão, a resultados em sentido idêntico.

Para além dos 2 cenários extremos selecionados para inverno e para o verão foram adicionalmente considerados os cenários “PreReab” e “PosReab”, que traduzem, respetivamente, o desempenho do Apartamento-Tipo numa fase anterior e posterior à reabilitação. Para facilitar a identificação dos 4 cenários estes foram renomeados. Os cenários 1 e 7 do Quadro 5.2 são, respetivamente, os cenários

“Melhor-inverno” e “Pior-inverno”, enquanto os cenários 2 e 3 do Quadro 5.2 são, respetivamente, os cenários “Pior-verão” e “Melhor-verão”. A identificação dos cenários consta do Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Cenários selecionados para avaliação do conforto térmico e da eficiência energética

Cenários de inverno	Cenários de verão
Melhor – inverno (1)	Melhor – verão (3)
Pior – inverno (7)	Pior – verão (2)
PreReab	PreReab
PosReab	PosReab

Os cenários do Quadro 5.3 constituem os cenários selecionados para desenvolver o estudo de sensibilidade para avaliação do conforto térmico e da eficiência energética, no inverno e no verão, em 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

5.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DO CLIMA EXTERIOR

5.3.1. ESTRATÉGIA ADOTADA

Pretende-se desenvolver um estudo de sensibilidade para os 4 cenários selecionados no Capítulo 5.2.4, em 4 localizações geográficas do território nacional, que vise avaliar o conforto térmico e a eficiência energética de um Apartamento-Tipo, no inverno e no verão.

Muito embora o conforto térmico dependa de variáveis como a temperatura do ar interior, a temperatura média radiante, a velocidade e a humidade relativa no interior, e o nível de vestuário e de atividade dos ocupantes, assume-se, dentro dos limites normais das outras variáveis, que a temperatura do ar interior é a variável dominante. Neste contexto justifica-se que se avalie as condições de conforto do Apartamento-Tipo com base no seu valor. O estudo de sensibilidade foi, pois, centrado no estudo dos valores da temperatura do ar interior, conforme justificado no Capítulo 4.6.1.

Procedeu-se à simulação da temperatura do ar interior nas zonas térmicas Z1, Z3 e Z6 do Apartamento-Tipo, contudo, para não tornar o estudo demasiado alongado, são apresentados resultados relativos a uma das zonas térmicas simuladas (Z6 – Quarto a SW).

O conforto térmico foi estudado, para cada localização geográfica, à luz do modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007). Recorreu-se adicionalmente ao estudo das curvas de frequência acumulada, e dos valores máximos e mínimos da temperatura do ar interior, para o inverno e para o verão, respetivamente.

A eficiência energética foi avaliada, para cada localização geográfica, recorrendo ao cálculo dos consumos de energia de aquecimento e arrefecimento para obtenção do conforto térmico definido com base no modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007).

Para se proceder à implementação de uma análise energética do Apartamento-Tipo simulado, foi considerada a instalação de um sistema de aquecimento e de arrefecimento ambiente com funcionamento dentro de uma gama variável de temperaturas entre os 18 °C e os 27 °C, na Categoria III da EN 15251 (CEN, 2007), e entre os 20 °C e os 26 °C na Categoria II. O princípio de funcionamento deste sistema é bastante simples: o sistema é programado para manter a temperatura do ar interior entre os limites de temperatura especificados. Sempre que a temperatura do ar interior da zona térmica em análise, em regime de variação livre de temperatura, desça o limite inferior ou suba o

limite superior, o termostato determina o acionamento do sistema de aquecimento ou de arrefecimento ambiente que, respetivamente, fornece ou extrai o calor necessário para que a temperatura do ar ambiente se situe no intervalo pretendido.

A implementação de um sistema que opera dentro de uma banda de conforto que varia entre 18 °C e 27 °C (Categoria III), ou entre 20 °C e 26 °C (Categoria II), permite estimar a energia, numa base anual, necessária ao aquecimento e arrefecimento das zonas térmicas que constituem o Apartamento-Tipo simulado (Figura 5.5).

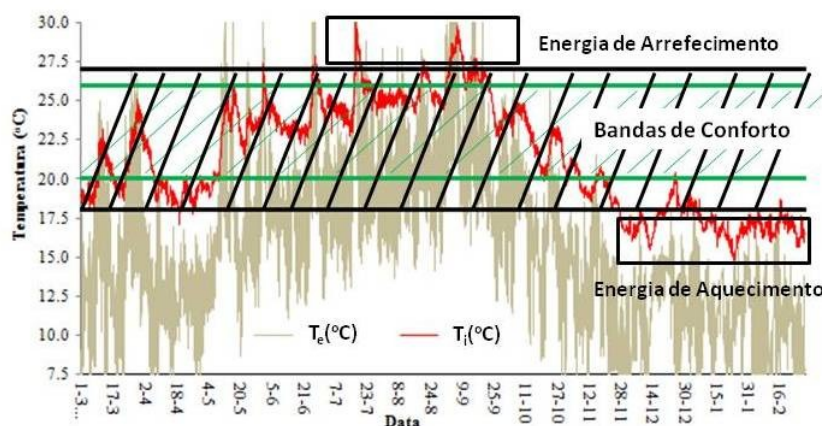


Figura 5.5 – Ilustração do princípio de cálculo da energia de aquecimento e de arrefecimento

Para finalizar, refere-se que as 4 localizações geográficas escolhidas foram as seguintes: Porto, Lisboa, Bragança e Faro. A escolha recaiu sobre cidades que no seu conjunto sejam representativas das zonas climáticas do território nacional (RCCTE, 2006).

A organização do texto adota a seguinte repartição:

- Nos Capítulos 5.3.2 e 5.3.3 é estudado o conforto térmico e a eficiência energética do Apartamento-Tipo para os cenários de simulação numérica considerados, no Porto e em Lisboa. De modo a reduzir a complexidade que resulta da apresentação dos resultados de simulação numérica, foi remetido para o Anexo IV da Tese, o estudo de avaliação do conforto térmico e da eficiência energética do Apartamento-Tipo, nas duas restantes localizações geográficas consideradas (Bragança e Faro);
- No Capítulo 5.3.4 é estudada a influência da localização no território nacional no desempenho térmico e no consumo energético do Apartamento-Tipo, para os cenários considerados, e é efetuado a representação gráfica no mapa de Portugal dos indicadores de desempenho calculados;
- No Capítulo 5.4 são sintetizadas as principais conclusões do estudo de simulação numérica dos cenários selecionados, nas 4 localizações geográficas definidas.

5.3.2. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO PORTO

5.3.2.1. CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO

De acordo com o preconizado no Capítulo 5.2.4, o estudo do conforto térmico e da eficiência energética do Apartamento-Tipo foi estabelecido para um conjunto de 4 cenários selecionados para o efeito: cenários “PreReab”, “PosReab”, “Melhor” e “Pior”.

Os cenários “Melhor” e “Pior” correspondem, respetivamente, aos cenários de melhor e pior desempenho térmico dentre os 72 cenários considerados. O cenário “Melhor”, dado o seu elevado desempenho, deve ser considerado uma referência para comparação com o cenário pós-reabilitação (“PosReab”). O cenário “Pior”, com desempenho térmico muito deficiente, pode ser retirado do estudo por não acrescentar mais-valia ao mesmo. Neste contexto, o cenário “Pior” será considerado no estudo desenvolvido para o Porto, contudo será retirado para as restantes 3 localizações geográficas.

Nos gráficos da Figura 5.6 apresenta-se o estudo do conforto térmico da zona térmica Z6 do Apartamento-Tipo na estação de aquecimento, no Porto, à luz da EN 15251, para os cenários “PreReab”, “PosReab”, “Melhor” e “Pior”. Os pontos representados no gráfico são os resultados horários de simulação numérica, obtidos no período entre 1 de outubro e 20 de abril (estação de aquecimento).

No Porto, os resultados relativos aos cenários “PosReab” e “Melhor” têm a maior parte dos seus pontos localizados acima das retas que representam o limite inferior de conforto, para as Categorias II e III, enquanto os relativos aos cenários “PreReab” e “Pior” estão abaixo das referidas retas evidenciando uma percentagem de desconforto térmico muito elevada.

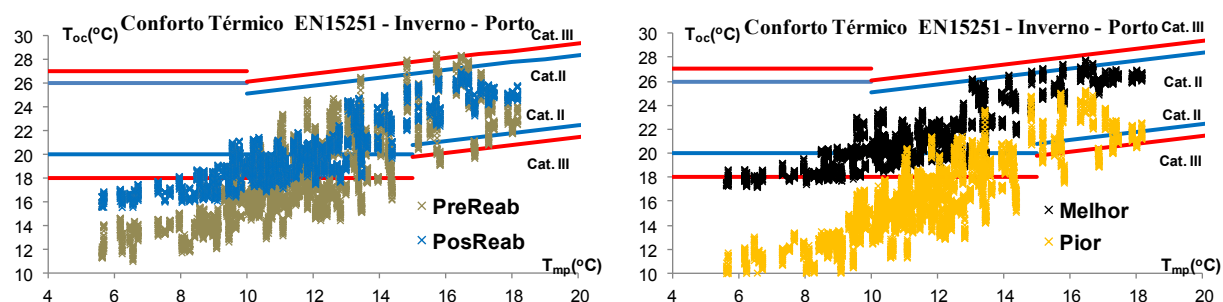


Figura 5.6 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento (Porto)

O número de horas de desconforto térmico na estação de aquecimento no Porto (6.7 meses), e as respetivas percentagens de desconforto, dos 4 cenários de simulação numérica, estão representados no Quadro 5.4. Os resultados referem-se às Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007).

Quadro 5.4 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento (Porto)

Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	Desconforto (h) Cat. III	Desconforto (h) Cat. II	% Cat. III	% Cat. II
6.7 m / 4848h	PreReab	Z6 (Q-SW)	2813	3620	58.0	74.7
	PosReab		912	2876	18.8	59.3
	Melhor		222	1489	4.6	30.7
	Pior		3675	4315	75.8	89.0

A percentagem de desconforto térmico de inverno do cenário “PreReab”, na Categoria III, é de 58 % da duração da estação de aquecimento (74.7 % para a Categoria II), e a do cenário “PosReab” é de apenas 18.8 % (59.3 % para a Categoria II). A redução da percentagem de horas de desconforto térmico em 40 %, para a Categoria III, e em 15 %, para a Categoria II, foi determinada pela reabilitação do edifício, nos moldes definidos no Capítulo 3.

A diferença entre a percentagem de desconforto dos cenários “Melhor” e “PosReab” é de 14.2 % na Categoria III (28.6 % na Categoria II). O cenário “Melhor” prevê a aplicação de 14 cm de XPS na cobertura do Apartamento-Tipo (8 cm de XPS no cenário “PosReab”) e de 8 cm de XPS na fachada opaca (ausência de isolamento térmico no cenário “PosReab”). A redução na percentagem de horas de

desconforto entre os 2 cenários não é muito significativa. O acréscimo de isolamento nas fachadas e na cobertura, não se traduz numa melhoria considerável do desempenho térmico de inverno.

O gráfico da Figura 5.7 representa as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior na estação de aquecimento, no Porto, dos 4 cenários. Os segmentos de reta verticais representados (20 °C para a Categoria II e 18 °C para a Categoria III) são as temperaturas operativas de conforto, especificadas pela EN 15251 (CEN, 2007), para apartamentos de edifícios residenciais. As curvas dos cenários “PosReab” e “Melhor” estão deslocadas no sentido das temperaturas crescentes, o que revela um desempenho térmico de inverno mais elevado, do que o dos restantes 2 cenários.

As frequências acumuladas para os limites de conforto de 18 °C (Cat. III) e 20 °C (Cat. II) são obtidas pela intersecção das curvas para os 4 cenários de simulação, com os segmentos de reta representados. As percentagens de desconforto dos cenários de melhor desempenho (“PosReab” e “Melhor”) são inferiores a 20 %, na Categoria III.

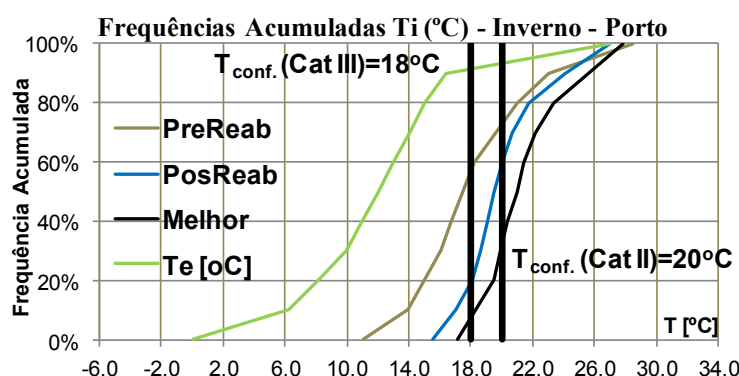


Figura 5.7 – Curva de frequências acumuladas de temperatura na estação de aquecimento (Porto)

O valor dos percentis de temperatura do ar interior, T_{10} e T_{50} , dos 4 cenários, permite estabelecer uma análise comparativa do seu desempenho térmico de inverno (Quadro 5.5).

A mediana, T_{50} , dos 2 cenários de melhor de desempenho (19.5 °C e 21.0 °C, respetivamente) é superior à temperatura de conforto de 18 °C (Categoria III). O percentil 10, T_{10} , varia entre 12.1 °C (cenário “Pior”) e 18.4°C (cenário “Melhor”). O valor de T_{10} dos cenários “PosReab” e “PreReab” é igual a 13.9°C e 17.0°C, respetivamente. Trata-se de uma diferença superior a 3°C que evidencia os benefícios da reabilitação implementada.

Quadro 5.5 - Percentis de temperatura na estação de aquecimento (Porto)

Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
6.7 m / 4848h	PreReab	Z6 (Q-SW)	13.9	17.4
	PosReab		17.0	19.5
	Melhor		18.4	21.0
	Pior		12.1	15.8

O valor da temperatura mínima do ar interior, T_{min} , é um indicador de desconforto de inverno. O gráfico da Figura 5.8 representa o valor mensal da temperatura mínima do ar interior em 3 meses da estação de aquecimento (dezembro, janeiro e fevereiro), para os 4 cenários em análise no Porto.

A diferença entre o valor de T_{min} dos cenários “PosReab” e “PreReab” é de 4.55 °C, sendo o aumento do valor de temperatura mínima do ar interior, um bom indicador dos benefícios da reabilitação. O

acréscimo no valor de T_{min} do cenário “PosReab” para o cenário “Melhor”, é de apenas 1.63 °C, o que uma vez mais acentua o bom desempenho térmico de inverno do edifício reabilitado.

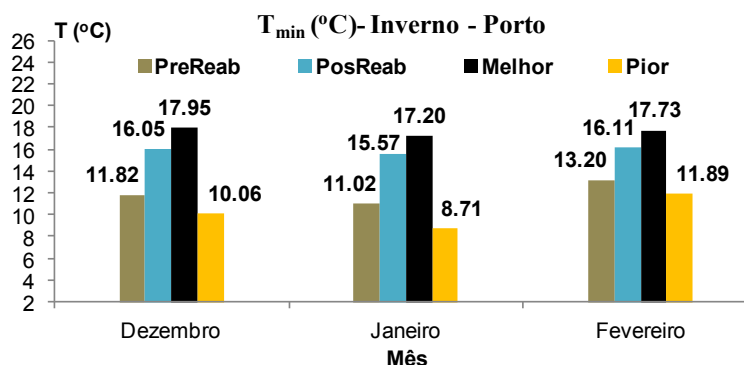


Figura 5.8 – Temperatura mínima mensal na estação de aquecimento (Porto)

5.3.2.2. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO

O estudo do conforto térmico da zona térmica Z6 do Apartamento-Tipo (quarto de dormir), na estação de arrefecimento, no Porto, à luz da EN 15251, encontra-se representado nos gráficos da Figura 5.9.

Os pontos representados são os resultados horários de simulação numérica, obtidos no período entre 1 de junho e 30 de setembro (estação de arrefecimento) dos cenários “PreReab”, “PosReab”, “Melhor” e “Pior”.

No Porto, destaca-se que os resultados referentes aos cenários “PosReab” e “Melhor” têm a maior parte dos seus pontos localizados abaixo das retas que representam o limite superior de conforto, para as Categorias II e III., enquanto os referentes aos cenários “PreReab” e “Pior” estão acima dos limites de conforto, o que evidencia um elevado desconforto térmico de verão.

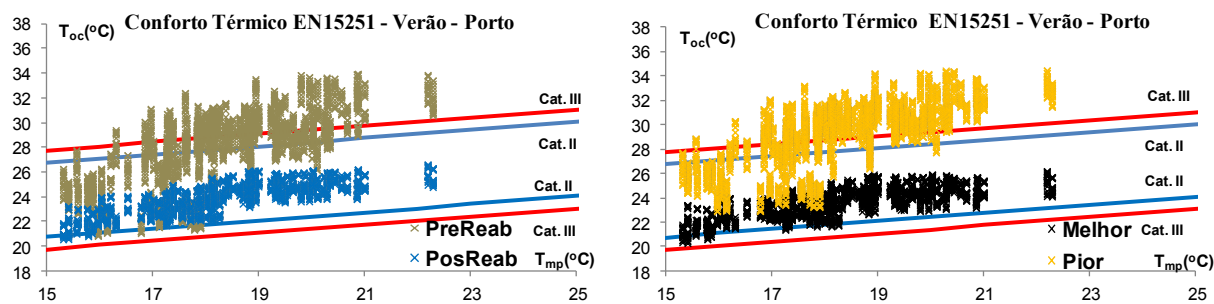


Figura 5.9 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento (Porto)

O Quadro 5.6 apresenta o número de horas de desconforto térmico na estação de arrefecimento no Porto (4 meses), e as respetivas percentagens de desconforto face ao número de total de horas, dos 4 cenários de simulação numérica. Tal como para a estação de aquecimento, os resultados referem-se às Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007).

De acordo com os valores do Quadro 5.6, no cenário “PreReab”, as percentagens de desconforto, nas Categorias III e II, são de 44.5 % e 61.3 %, respetivamente, enquanto para os cenários “PosReab” e “Melhor”, o desconforto térmico de verão é nulo.

O desconforto térmico de verão foi corrigido em absoluto com a reabilitação dos edifícios descrita no Capítulo 3.

Quadro 5.6 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento (Porto)

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	Desconforto (h) Cat. III	Desconforto (h) Cat. II	% Cat. III	% Cat. II
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	1304	1794	44.5	61.3
	PosReab		0	0	0.0	0.0
	Melhor		0	0	0.0	0.0
	Pior		1939	2246	66.2	76.7

O estudo das frequências acumuladas de temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento (4 meses), permite avaliar o desempenho térmico de verão dos 4 cenários de simulação numérica. A Figura 5.10 representa as curvas de frequência acumulada de temperatura, no Porto, dos cenários “PreReab”, “PosReab”, “Melhor” e “Pior”. Os segmentos de reta verticais representados (26 °C para a Categoria II e 27 °C para a Categoria III) são as temperaturas operativas de conforto, especificadas como limite de admissibilidade pela EN 15251 (CEN, 2007), para apartamentos de edifícios residenciais.

No gráfico observa-se cenários com desempenho de verão distinto: por um lado os cenários “Melhor” e “PosReab” cujas curvas se apresentam quase sobrepostas, e por outro, os cenários “PreReab” e “Pior”, com curvas de traçado quase paralelo, bastante afastado das curvas dos cenários de melhor desempenho.

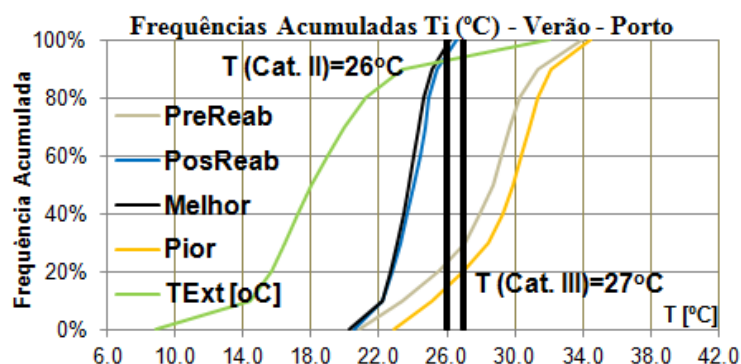


Figura 5.10 – Curva de frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Porto)

O cálculo das frequências acumuladas de temperatura permite obter a percentagem de horas da estação de arrefecimento em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor do limite de conforto especificado nas Categorias II e III (26 °C e 27 °C, respetivamente). Os valores das frequências acumuladas que constam do Quadro 5.7 são obtidas pela intersecção das curvas para os 4 cenários de simulação, com os segmentos de reta representados na Figura 5.10.

Quadro 5.7 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Porto)

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	F_{acum} (T=26°C)	F_{acum} (T=27°C)
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	23.5%	29.6%
	PosReab		97.7%	100.0%
	Melhor		99.9%	100.0%
	Pior		14.3%	20.1%

O estudo de frequências acumuladas apresentado no Quadro 5.7 permite extrair as seguintes conclusões:

- Nos cenários “PosReab” e “Melhor”, a temperatura-limite de conforto de 27 °C (Categoria III) nunca é atingida. No cenário “PreReab” o limite de 27 °C não é ultrapassado em 29.6 % das horas da estação de arrefecimento;
- Na Categoria II, a temperatura-limite de conforto de 26 °C é excedida em apenas 2.3 % (cenário “PosReab”) e 0.1 % (cenário “Melhor”) do total de horas da estação de arrefecimento. No cenário “PreReab”, o limite de 26 °C não é ultrapassado em 23.5 % das horas.

O valor dos percentis de temperatura do ar interior, T_{50} e T_{90} , na estação de arrefecimento são bons indicadores de desempenho térmico de verão, dos 4 cenários de simulação numérica estudados (Quadro 5.8).

Quadro 5.8 - Percentis de temperatura na estação de arrefecimento (Porto)

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	28.7	31.4
	PosReab		24.0	25.4
	Melhor		23.7	25.1
	Pior		29.9	32.2

O valor da mediana, T_{50} , nos cenários “PosReab” e “Melhor” é inferior a 25 °C (24.0 °C no cenário “PosReab” e 23.7 °C no cenário “Melhor”). Para ambos os cenários configura-se uma situação de conforto térmico. Nos cenários “PreReab” e “Pior”, o valor da mediana é próximo de 30 °C (28.7 °C no cenário “PreReab” e 29.9 °C no cenário “Pior”), o que revela um elevado desconforto térmico de verão.

O valor do percentil 90 de temperatura, T_{90} , nos cenários de melhor desempenho é próximo dos 25 °C, o que significa que em 10 % da duração da estação de arrefecimento se atingem valores superiores a 25 °C, valor apontado como referência à luz do RCCTE (RCCTE, 2006).

O gráfico da Figura 5.11 representa o valor mensal da temperatura máxima do ar interior em 3 meses da estação de arrefecimento (julho, agosto e setembro), para os 4 cenários em análise no Porto.

O cálculo do valor da temperatura máxima do ar interior, T_{max} , na estação de arrefecimento permite avaliar o risco de sobreaquecimento. O risco de sobreaquecimento existe sempre que o valor da temperatura do ar interior excede 28 °C, por um período superior a 1 % do período de ocupação do compartimento (CIBSE, 2008).

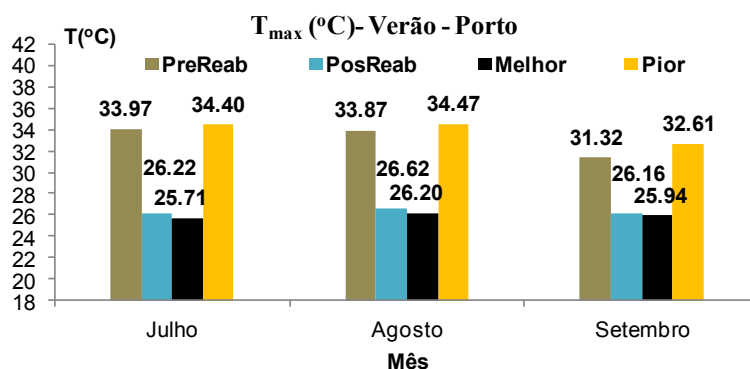


Figura 5.11 – Temperatura máxima mensal na estação de arrefecimento (Porto)

O valor da temperatura máxima do ar interior dos cenários de melhor desempenho é próximo de 26 °C (26.62 °C para o cenário “PosReab” e 26.20 °C para o cenário “Melhor”), o que afasta o risco de sobreaquecimento.

A diferença entre o valor da temperatura máxima nos cenários “PosReab” e “Melhor” é de apenas 0.42 °C, o que configura, para ambos os cenários, um desempenho térmico de verão muito similar.

5.3.2.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO

A variação do consumo energético mensal necessário à obtenção do conforto térmico de inverno, do quarto de dormir do Apartamento-Tipo (zona térmica Z6), nas Categorias II e III (20 °C e 18 °C, respetivamente), ao longo da estação de aquecimento, no Porto, está representado nos gráficos da Figura 5.12.

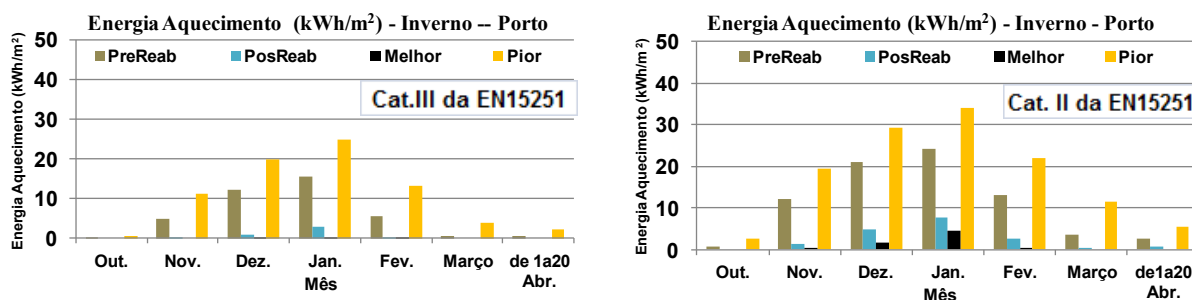


Figura 5.12 – Valores mensais da energia de aquecimento, no inverno, nas Categorias II e III (Porto)

Para os 4 cenários, o valor máximo do consumo energético de aquecimento é atingido no mês de janeiro. Nos cenários de melhor desempenho térmico (“PosReab” e “Melhor”), o valor da energia de aquecimento nos restantes meses (outubro, novembro, dezembro, fevereiro, março e abril), nas Categorias II e III, é inferior a 10 kWh/m², valor reduzido que configura os cenários “PosReab” e “Melhor” como eficientes de um ponto de vista energético.

No Quadro 5.9 apresenta-se os valores mensais da energia de aquecimento no Porto, nas Categorias II e III, para os 4 cenários em análise, e o valor do consumo energético anual correspondente à soma dos valores mensais ao longo da estação de aquecimento.

Quadro 5.9 - Valores mensais da energia de aquecimento no inverno (Porto)

Cat.	Cenário	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Março	1 a 20 abril	Total (kWh/m ²)
III	PreReab	0.09	4.77	12.16	15.64	5.61	0.42	0.60	39.29
	PosReab	0.00	0.02	0.97	2.88	0.31	0.00	0.00	4.17
	Melhor	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.35
	Pior	0.44	11.04	19.91	24.92	13.24	3.88	2.33	75.76
II	PreReab	0.83	12.13	21.14	24.35	13.06	3.42	2.57	77.50
	PosReab	0.00	1.34	4.89	7.62	2.71	0.42	0.78	17.76
	Melhor	0.00	0.04	1.72	4.56	0.53	0.00	0.00	6.85
	Pior	2.73	19.50	29.41	34.14	21.83	11.50	5.40	124.52

O valor da energia de aquecimento do cenário “PosReab”, na Categoria III (18 °C), é de 4.17 kWh/m², cerca de 10 % do valor do cenário “PreReab”. Na Categoria II (20 °C), o valor da energia de aquecimento é de 17.76 kWh/m² (22.9 % do valor do cenário “PreReab”). A reabilitação construtiva do edifício garante, por si só, um incremento da eficiência energética de inverno do Apartamento-Tipo.

A diferença entre o valor da energia de aquecimento dos cenários “PosReab” e “Melhor” é muito reduzida na Categoria III (3.82 kWh/m²) e mais elevada na Categoria II (10.91 kWh/m²).

5.3.2.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO

A variação do valor da energia de arrefecimento mensal necessária à obtenção do conforto térmico de verão, na zona térmica Z6 do Apartamento-Tipo (quarto de dormir), nas Categorias II e III, no Porto, está representada nos gráficos da Figura 5.13.

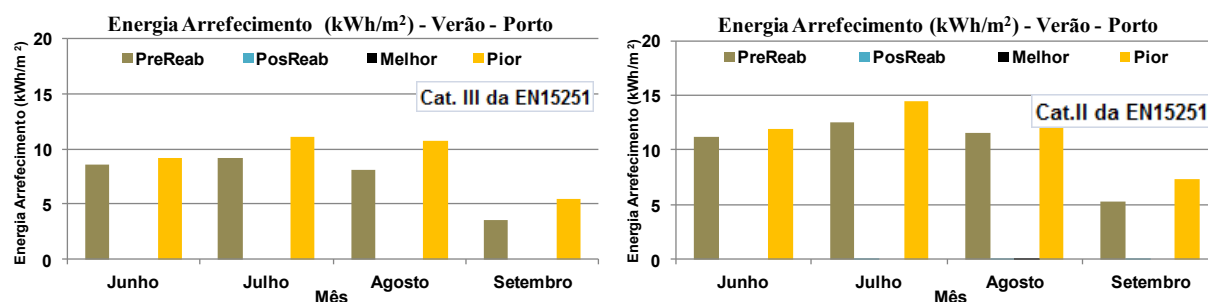


Figura 5.13 – Valores mensais da energia de arrefecimento, no verão, nas Categorias II e III (Porto)

Os valores do consumo energético de arrefecimento referentes aos cenários de melhor desempenho térmico de verão (“PosReab” e “Melhor”) são nulos, nas Categorias II e III, para os 4 meses da estação de arrefecimento. Nos restantes cenários (“PreReab” e “Pior”) atingem-se valores de consumo energético nos meses de julho e de agosto, na Categoria III, próximos de 10 kWh/m², e na Categoria II, próximos de 15 kWh/m².

No Quadro 5.10 apresenta-se os valores mensais da energia de arrefecimento no Porto, nas Categorias II e III, para os 4 cenários em análise, e o valor do consumo energético anual correspondente à soma dos valores mensais ao longo da estação de arrefecimento.

Quadro 5.10 - Valores mensais da energia de arrefecimento no verão (Porto)

Cat.	Cenário	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Total (kWh/m ²)
III	PreReab	8.55	9.17	8.13	3.60	29.45
	PosReab	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Melhor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pior	9.16	11.08	10.79	5.51	36.54
II	PreReab	11.13	12.55	11.60	5.27	40.54
	PosReab	0.00	0.02	0.06	0.02	0.10
	Melhor	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
	Pior	11.90	14.47	14.32	7.37	48.07

O valor anual da energia de arrefecimento no cenário “PreReab” é próximo de 30 kWh/m², na Categoria III, e superior a 40 kWh/m², na Categoria II. A reabilitação construtiva do edifício, de acordo com o descrito no Capítulo 3, permitiu, no Porto, reduzir a energia de arrefecimento para um valor nulo. A diferença entre o valor da energia de arrefecimento dos cenários “PosReab” e “Melhor” é próxima de zero, para ambas as categorias. O cenário “PosReab” é um cenário eficiente de um ponto de vista do desempenho energético de verão.

5.3.3. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM LISBOA

5.3.3.1. CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO

À semelhança do desenvolvido para o Porto, os gráficos da Figura 5.14 representam o estudo do conforto térmico da zona térmica Z6 do Apartamento-Tipo, na estação de aquecimento, em Lisboa, à luz da EN 15251, para os cenários “PreReab”, “PosReab” e “Melhor”.

Os pontos representados nos gráficos são os resultados horários de simulação numérica, obtidos no período entre 21 de outubro e 31 de março, correspondente à estação de aquecimento em Lisboa.

Os 3 cenários estão agrupados em 2 gráficos que estabelecem a seguinte comparação:

- Comparação entre os cenários “PreReab” e “PosReab”. No gráfico que compara os cenários pré e pós-reabilitação do edifício, os pontos referentes ao cenário “PosReab” estão na sua maior parte localizados por cima das retas que representam o limite inferior de conforto nas Categorias II e III, enquanto os referentes ao cenário “PreReab” estão em geral abaixo dos referidos limites de conforto;
- Comparação entre os cenários “Melhor” e “PosReab”. No gráfico que compara os cenários “PosReab” e “Melhor” destaca-se um desempenho térmico similar para ambos os cenários. A percentagem de desconforto do cenário “Melhor”, na Categoria III, é nula.

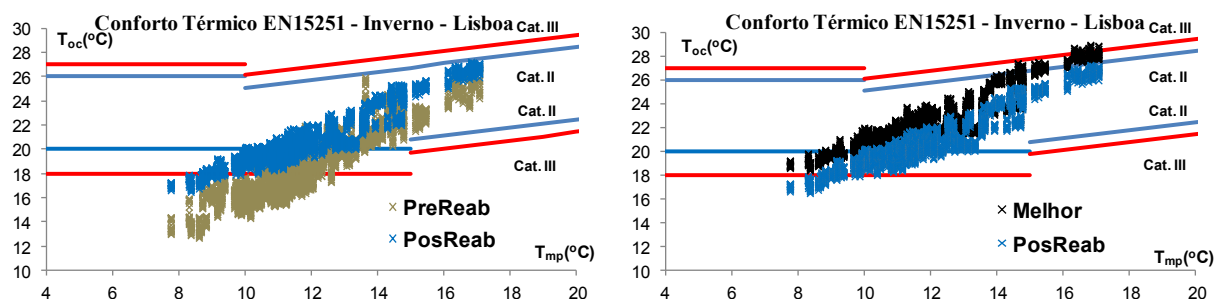


Figura 5.14 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento (Lisboa)

O Quadro 5.11 apresenta o número de horas de desconforto térmico na estação de aquecimento em Lisboa, e as respetivas percentagens de desconforto para os 3 cenários de simulação numérica. Os resultados referem-se às Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007).

Quadro 5.11 - Conforto térmico à luz da EN 15215 na estação de aquecimento (Lisboa)

Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	Desconforto (h)	Desconforto (h)	%	%
			Cat. III	Cat. II	Cat. III	Cat. II
5.3 m / 3888h	PreReab	Z6 (Q-SW)	2031	2813	52.2	72.4
	PosReab		183	1704	4.7	43.8
	Melhor		0	342	0.0	8.8

A análise dos resultados permite constatar que a percentagem de desconforto térmico do cenário “PosReab”, na Categoria III, é de apenas 4.7 %, enquanto a do cenário “PreReab” é de 52.2 %. A reabilitação do edifício em Lisboa traduzir-se-ia numa redução de 47.5 %, do número de horas de desconforto de inverno.

Na Categoria II, a percentagem de desconforto do cenário “PosReab” é mais elevada (43.8 %) do que a registada na Categoria III. Há no entanto uma melhoria considerável do desempenho térmico de inverno face ao cenário “PreReab”, que apresenta uma percentagem de desconforto de 72.4 %.

A percentagem de desconforto térmico do cenário otimizado (cenário “Melhor”) é nula na Categoria III e de 8.8% na Categoria II. À semelhança do comentado para o Porto no Capítulo 5.3.2.1, o acréscimo de isolamento nas fachadas e na cobertura, previsto no cenário “Melhor”, não se traduz, na Categoria III, numa redução muito significativa da percentagem de horas de desconforto em Lisboa.

A Figura 5.15 representa as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior na estação de aquecimento, em Lisboa, para os cenários “PreReab”, “PosReab” e “Melhor”.

Na Categoria III, as percentagens de desconforto dos cenários de melhor desempenho térmico de inverno (“PosReab” e “Melhor”) é quase nula.

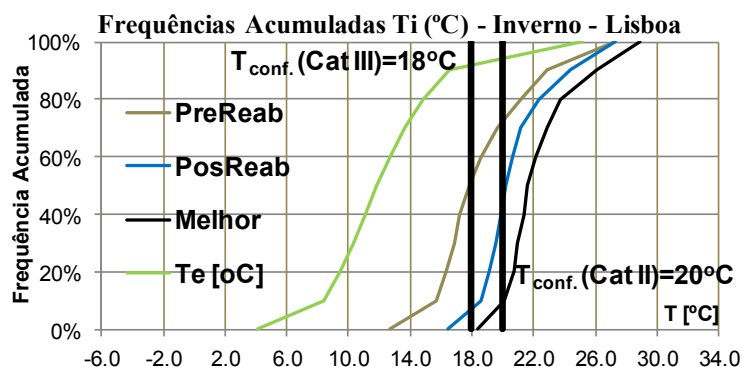


Figura 5.15 – Curva de frequências acumuladas de temperatura na estação de aquecimento (Lisboa)

No Quadro 5.12 representa-se os valores dos percentis de temperatura do ar interior, T_{10} e T_{50} , dos 3 cenários em análise.

Quadro 5.12 - Percentis de temperatura na estação de aquecimento (Lisboa)

Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
5.3 m / 3888h	PreReab	Z6 (Q-SW)	15.7	17.8
	PosReab		18.6	20.2
	Melhor		20.1	21.6

O valor da mediana, T_{50} , dos cenários “PosReab” e “Melhor” (20.2°C e 21.6°C, respetivamente) é superior ao valor da temperatura de conforto nas Categorias III (18°C) e II (20°C), o que revela um desempenho térmico de inverno elevado.

O valor do percentil 10 de temperatura, T_{10} , nos cenários “PosReab” e “PreReab”, é respetivamente igual a 15.7 °C e 18.6 °C. A reabilitação construtiva do edifício, em Lisboa, permitiria que o valor de T_{10} fosse superior à temperatura de conforto para a Categoria III (18 °C).

O gráfico da Figura 5.16 representa o valor mensal da temperatura mínima do ar interior, T_{min} , em 3 meses da estação de aquecimento (dezembro, janeiro e fevereiro), para os 3 cenários em análise em Lisboa.

A diferença entre o valor de T_{min} nos cenários “PosReab” e “PreReab” é de 3.8 °C. O acréscimo no valor da temperatura mínima é próximo dos 4 °C, o que traduz o efeito benéfico da reabilitação do edifício no aumento do conforto térmico de inverno.

O aumento no valor de T_{min} do cenário “PosReab” para o cenário “Melhor” é de apenas 1.9 °C. A estratégia de reabilitação referente ao cenário “Melhor”, que envolve a aplicação de isolamento na fachada (8 cm XPS) a par do reforço do isolamento da cobertura (14 cm XPS), traduz-se num acréscimo moderado do desempenho térmico de inverno, em comparação com o do cenário “PosReab”.

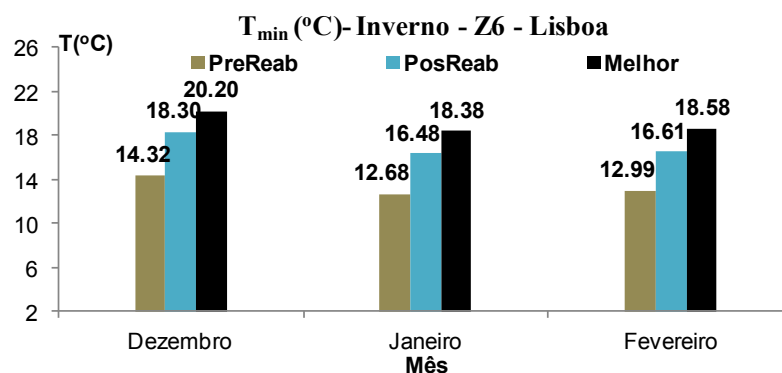


Figura 5.16 – Temperatura mínima mensal na estação de aquecimento (Lisboa)

5.3.3.2. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO

O estudo do conforto térmico de verão da zona térmica Z6 do Apartamento-Tipo (quarto de dormir), em Lisboa, à luz da norma EN 15251, para os cenários “PreReab”, “PosReab” e “Melhor” é apresentado nos gráficos da Figura 5.17.

Os gráficos estabelecem a comparação entre os cenários “PreReab” e “PosReab”, e os cenários “PosReab” e “Melhor”, no período entre 1 de junho e 30 de setembro (estação de arrefecimento). A observação dos resultados permite constatar que o cenário “PreReab” apresenta um menor desempenho térmico de verão do que os restantes.

Os pontos correspondentes ao cenário “PreReab” estão localizados por cima das linhas referentes aos valores-limite da temperatura de conforto, nas Categorias II e III, o que evidencia um cenário de desconforto térmico. Os pontos correspondentes aos cenários “PosReab” e “Melhor” estão localizados abaixo das referidas linhas, quase sobrepostos, evidenciando um elevado desempenho térmico de verão.

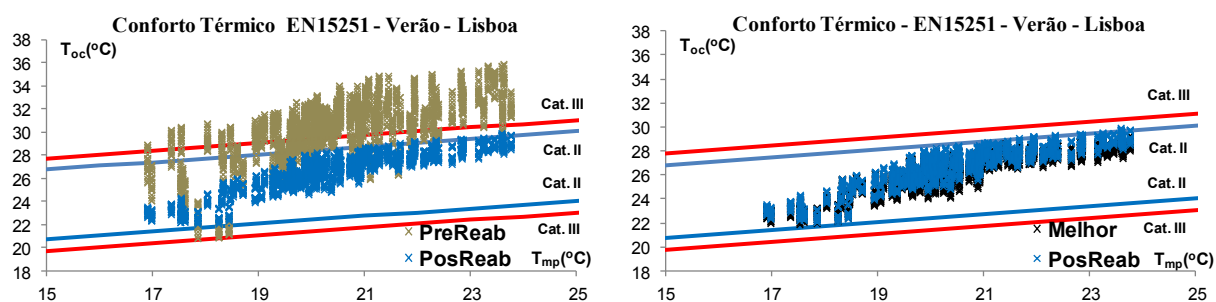


Figura 5.17 – Conforto Térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento (Lisboa)

No Quadro 5.13 apresenta-se o número de horas de desconforto térmico na estação de arrefecimento em Lisboa, e as respetivas percentagens de desconforto face ao número total de horas, dos 3 cenários de simulação numérica em Lisboa. Os resultados referem-se às Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007).

A análise dos resultados permite concluir que a reabilitação do edifício permitiria, em Lisboa, a correção quase em absoluto do desconforto térmico de verão. A percentagem de desconforto térmico do cenário “PosReab” é nula, na Categoria III, e de apenas 1.6 %, na Categoria II (46 horas em toda a estação de arrefecimento).

Quadro 5.13 - Conforto térmico à luz da EN 15215 na estação de arrefecimento (Lisboa)

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	Desconforto (h) Cat. III	Desconforto (h) Cat. II	% Cat. III	% Cat. II
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	2037	2379	69.6	81.3
	PosReab		0	46	0.0	1.6
	Melhor		0	0	0.0	0.0

A Figura 5.18 representa as curvas de frequência acumulada de temperatura, em Lisboa, dos cenários “PreReab”, “PosReab” e “Melhor”.

À semelhança do constatado para o Porto, as curvas de frequência acumulada relativas aos cenários “Melhor” e “PosReab”, em Lisboa, estão afastadas da curva relativa ao cenário “PreReab”, o que revela um desempenho térmico de verão, entre cenários, bastante diferenciado.

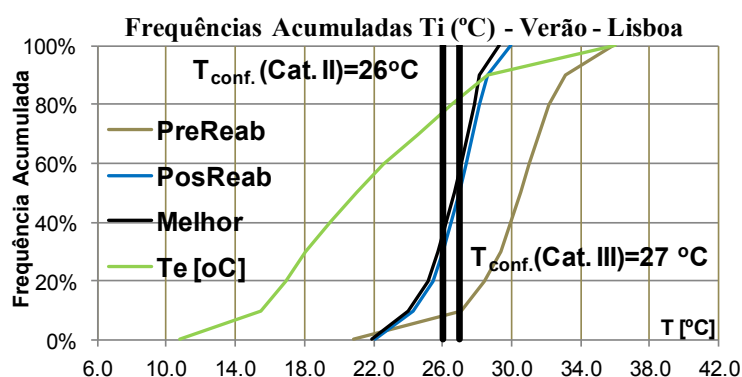


Figura 5.18 – Curva de frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Lisboa)

No Quadro 5.14 apresenta-se a percentagem de horas da estação de arrefecimento em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor do limite de conforto especificado nas Categorias II e III (26 °C e 27 °C, respetivamente).

Quadro 5.14 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento (Lisboa)

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	F_{acum} (T=26°C)	F_{acum} (T=27°C)
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	5.6%	9.5%
	PosReab		29.6%	50.4%
	Melhor		36.7%	57.6%

O estudo de frequências acumuladas apresentado no Quadro 5.14 permite extrair as seguintes conclusões:

- A temperatura-limite de conforto de 27 °C (Categoria III) é excedida em 40.6 % das horas da estação de arrefecimento, no cenário “PosReab” e em 42.4 %, no cenário “Melhor”. Os períodos em que a temperatura-limite de conforto é excedida constituem períodos de desconforto térmico de verão. Estes resultados são diferentes dos obtidos no estudo de conforto térmico desenvolvido à luz do modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007), o qual estima valores nulos de desconforto, na Categoria III, para ambos os cenários;
- A temperatura-limite de conforto de 26 °C (Categoria II) é excedida em mais de 70 % das horas da estação de arrefecimento nos cenários “PosReab” e “Melhor”. Tal como na Categoria

III, estes resultados são divergentes dos obtidos no estudo de conforto térmico desenvolvido à luz do modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007), que prevê percentagens de desconforto quase nulas.

O Quadro 5.15 apresenta os valores dos percentis de temperatura do ar interior, T_{50} e T_{90} , na estação de arrefecimento, dos 3 cenários de simulação numérica estudados.

Quadro 5.15 - Percentis de temperatura na estação de arrefecimento (Lisboa)

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	30.5	33.1
	PosReab		27.0	28.6
	Melhor		26.7	28.2

O valor da mediana, T_{50} , nos cenários “PosReab” e “Melhor” não excede 27 °C, valor correspondente ao limite de conforto na Categoria III. Nestes cenários, a diferença entre o valor de T_{50} não excede 0.3 °C. Trata-se, pois, de cenários equivalentes de um ponto de vista do desempenho térmico de verão.

O valor do percentil 90 de temperatura, T_{90} , nos cenários de melhor desempenho é superior a 28 °C, o que indicia risco de sobreaquecimento nos 2 cenários. O risco de sobreaquecimento existe sempre que o valor da temperatura do ar interior excede 28 °C, por um período superior a 1 % do período de ocupação do compartimento (CIBSE, 2008).

O gráfico da Figura 5.19 representa o valor mensal da temperatura máxima do ar interior, T_{max} , em 3 meses da estação de arrefecimento (julho, agosto e setembro), para os 3 cenários em análise em Lisboa.

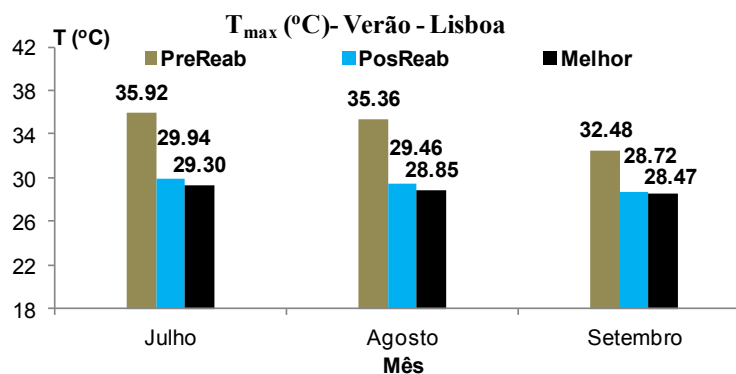


Figura 5.19 – Temperatura máxima mensal na estação de arrefecimento (Lisboa)

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.19 permite constatar que diferença entre o valor da temperatura máxima do ar interior, T_{max} , dos cenários “PreReab” (35.92 °C) e “PosReab” (29.94 °C) é próxima de 6 °C. A reabilitação do edifício, em Lisboa, permitiria uma elevada melhoria do desempenho térmico de verão.

A diferença entre o valor da temperatura máxima dos cenários “PosReab” e “Melhor” é de apenas 0.64 °C, o que configura um desempenho térmico de verão muito similar.

Apesar da melhoria de desempenho, o valor da temperatura máxima dos cenários “PosReab” e “Melhor” é próximo de 30 °C, o que indicia um risco de sobreaquecimento para os 2 cenários.

5.3.3.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO

Os gráficos da Figura 5.20 representam a variação do consumo energético mensal necessário à obtenção do conforto térmico de inverno, do quarto de dormir do Apartamento-Tipo (zona térmica Z6), nas Categorias II e III (20 °C e 18 °C, respetivamente), ao longo da estação de aquecimento, em Lisboa.

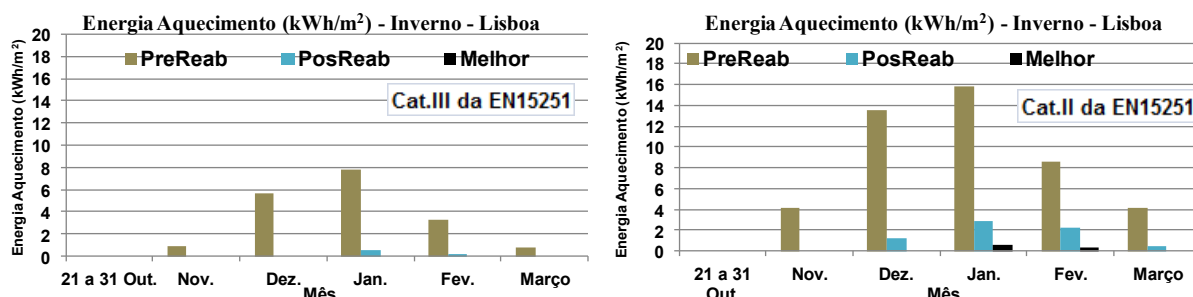


Figura 5.20 – Valores mensais da energia de aquecimento, no inverno, nas Categorias II e III (Lisboa)

A observação do gráfico permite constatar que nos cenários “PosReab” e “Melhor”, o valor do consumo de energia nos meses da estação de aquecimento, em ambas as Categorias, não excede 3.0 kWh/m². Em outubro e novembro, o valor da energia de aquecimento nos cenários de melhor desempenho é nulo.

No Quadro 5.16 apresenta-se os valores mensais da energia de aquecimento em Lisboa, nas Categorias II e III, para os 3 cenários em análise, e o valor do consumo energético anual correspondente à soma dos valores mensais ao longo da estação de aquecimento.

Quadro 5.16 - Valores mensais da energia de aquecimento no inverno (Lisboa)

Cat.	Cenário	21 a 31 Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Março	Total (kWh/m²)
III	PreReab	0.00	0.87	5.63	7.78	3.24	0.83	18.34
	PosReab	0.00	0.00	0.00	0.49	0.19	0.00	0.68
	Melhor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
II	PreReab	0.00	4.08	13.55	15.80	8.58	4.15	46.16
	PosReab	0.00	0.00	1.20	2.87	2.24	0.45	6.78
	Melhor	0.00	0.00	0.00	0.61	0.38	0.00	0.99

Os resultados apresentados no Quadro 5.16 permitem concluir que o valor da energia de aquecimento do cenário “PosReab” é de 3.7 % do valor do cenário “PreReab”, na Categoria III, e de 14.7 %, na Categoria II. A reabilitação construtiva do edifício garantiria, por si só, em Lisboa, um incremento da eficiência energética do Apartamento-Tipo.

A diferença entre o valor da energia de aquecimento dos cenários “PosReab” e “Melhor” é de 0.68 kWh/m², na Categoria III, e de 5.79 kWh/m² na Categoria II. A diferença é reduzida na Categoria III, contudo assume um valor mais elevado (próximo de 6 kWh/m²) na Categoria II.

5.3.3.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO

Os gráficos da Figura 5.21 representam a variação do valor da energia de arrefecimento mensal necessária à obtenção do conforto térmico de verão, na zona térmica Z6 do Apartamento-Tipo (quarto de dormir), nas Categorias II e III, em Lisboa.

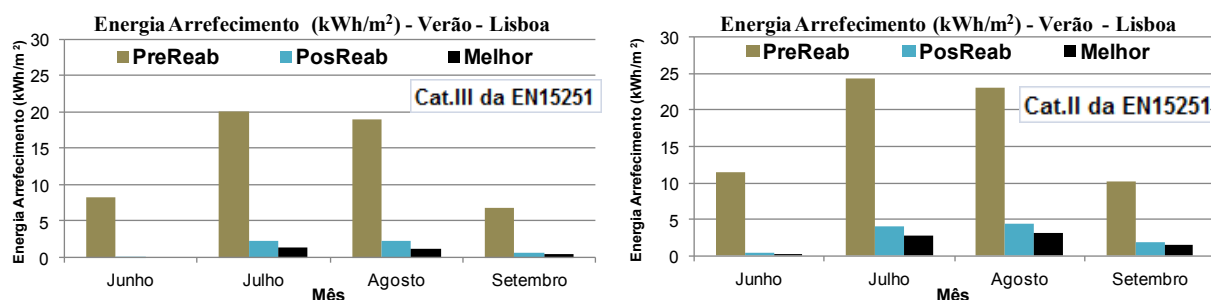


Figura 5.21 – Valores mensais da energia de arrefecimento, no verão, nas Categorias II e III (Lisboa)

O valor do consumo energético de arrefecimento nos meses de julho e agosto, do cenário “PreReab” é superior a 15 kWh/m², na Categoria III, e superior a 20 kWh/m², na Categoria II. O cenário “PosReab” apresenta, nos referidos meses, consumos inferiores a 5 kWh/m². A reabilitação do edifício traduzir-se-ia num incremento do desempenho energético de verão, assinalado pela redução considerável do consumo da energia de arrefecimento.

No Quadro 5.17 apresenta-se os valores mensais da energia de arrefecimento em Lisboa, nas Categorias II e III, para os 3 cenários em análise, e o valor do consumo energético anual correspondente à soma dos valores mensais ao longo da estação de arrefecimento.

Quadro 5.17 - Valores mensais da energia de arrefecimento no verão (Lisboa)

Cat.	Cenário	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Total (kWh/m ²)
III	PreReab	8.32	20.12	18.92	6.74	54.10
	PosReab	0.01	2.24	2.26	0.69	5.19
	Melhor	0.00	1.34	1.14	0.50	2.98
II	PreReab	11.47	24.29	23.07	10.15	68.98
	PosReab	0.33	4.03	4.42	1.84	10.62
	Melhor	0.05	2.70	3.08	1.41	7.24

Os valores apresentados no Quadro 5.17 permitem constatar que o valor de energia de arrefecimento nos cenários de melhor desempenho energético de verão (“PosReab” e “Melhor”) é inferior a 6 kWh/m², na Categoria III, e um pouco superior, contudo inferior a 11 kWh/m², na Categoria II.

A reabilitação construtiva do edifício, de acordo com o descrito no Capítulo 3, permitiria, em Lisboa, conseguir uma redução acentuada no valor da energia de arrefecimento. O consumo anual de energia no cenário “PreReab” é próximo de 55 kWh/m², na Categoria III, e superior a 68 kWh/m², na Categoria II. No cenário “PosReab” os consumos energéticos de arrefecimento são de apenas 10 a 15 % dos do cenário “PreReab”, o que evidencia um ganho de eficiência energética de verão.

A diferença entre o valor da energia de arrefecimento dos cenários “PosReab” e “Melhor” é de aproximadamente 3 kWh/m², para ambas as categorias. O ganho é reduzido, o que vem confirmar o cenário “PosReab” como um cenário eficiente de um ponto de vista do desempenho energético de verão.

5.3.4. INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO TERRITÓRIO NACIONAL – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS

5.3.4.1. ANÁLISE COMPARATIVA DO CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO

Foi estabelecida uma análise comparativa do desempenho térmico de inverno entre os cenários de simulação estudados, nas 4 localizações geográficas do território nacional. Para tal, foram comparados os valores de 2 indicadores de desempenho térmico, calculados no estudo de sensibilidade desenvolvido nos Capítulos 5.3.2 e 5.3.3: a percentagem de desconforto de inverno, nas Categorias II e III, e o valor do percentil de temperatura, T_{10} , no inverno.

No gráfico da Figura 5.22 são comparados os valores da percentagem de desconforto térmico na estação de aquecimento, na Categoria III, para as 4 localizações geográficas do território nacional (Porto, Lisboa, Bragança e Faro), nos 3 cenários de simulação estudados (“PreReab”, “PosReab” e “Melhor”).

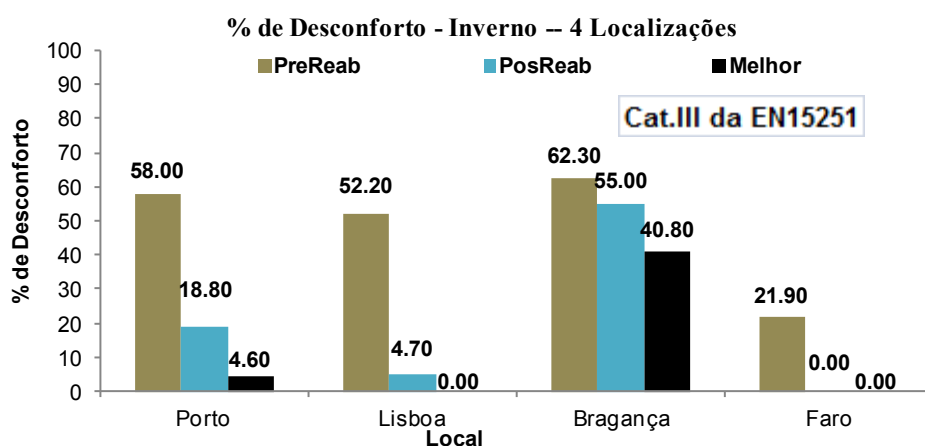


Figura 5.22 – Comparação da percentagem de desconforto térmico de inverno (Cat. III)

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.22 permite estabelecer os seguintes comentários:

- O cenário de menor desempenho térmico de inverno (cenários “PreReab”) evidencia uma percentagem de desconforto térmico muito similar, em 3 dos locais ensaiados. A exceção é Faro, que apresenta uma percentagem de desconforto térmico mais reduzida, na Categoria III. O clima ameno de inverno de Faro proporciona valores de desconforto térmico de inverno mais baixos, mesmo para um cenário de menor desempenho como o indicado;
- Os cenários de maior desempenho térmico de inverno (cenários “PosReab” e “Melhor”) evidenciam uma percentagem de desconforto térmico diferenciada nos 4 locais ensaiados. Em Bragança, a percentagem de desconforto térmico de inverno, na Categoria III, é superior a 50 %. No Porto e em Lisboa, a percentagem de desconforto é inferior a 20 % e em Faro a percentagem de desconforto é nula.

Na Figura 5.23 apresenta-se a representação gráfica da percentagem de desconforto térmico de inverno, na Categoria III, para os 3 cenários de simulação estudados. A percentagem de desconforto dos cenários de melhor desempenho térmico de inverno (“PosReab” e “Melhor”) são reduzidas no Porto, Lisboa e Faro, e mais elevadas em Bragança, o que permite concluir que não é possível existir conforto térmico em Bragança sem aquecimento do ar ambiente.

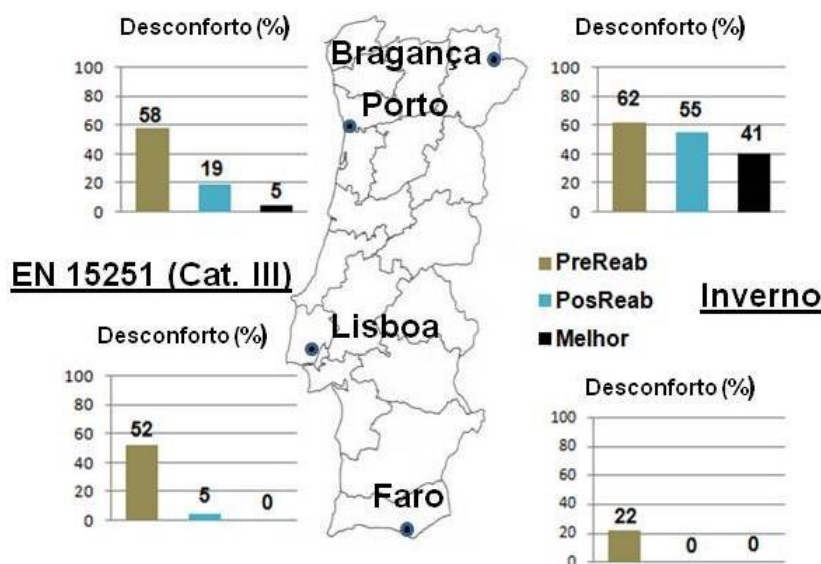


Figura 5.23 – Representação gráfica do desconforto térmico de inverno (Cat. III)

À semelhança do efetuado na Categoria III, no gráfico da Figura 5.24 são comparados os valores da percentagem de desconforto térmico na estação de aquecimento, na Categoria II.

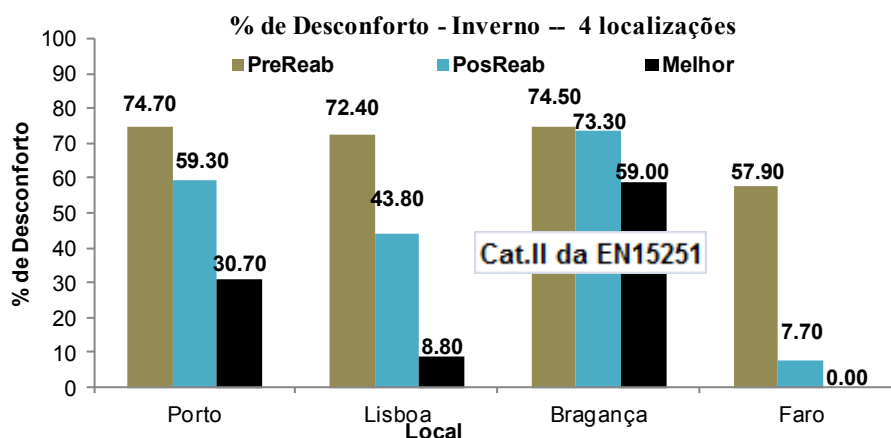


Figura 5.24 – Comparação das percentagens de desconforto térmico de inverno (Cat. II)

Da análise dos resultados apresentados na Figura 5.24 conclui-se o seguinte:

- A percentagem de desconforto térmico de inverno do cenário “PreReab”, na Categoria II, é superior a 50 % nas 4 localizações. No cenário “PosReab”, a redução do desconforto é particularmente evidente no sul de Portugal (Lisboa e Faro), e menos evidente a norte. No Porto, a redução do desconforto é de apenas 15 %, e em Bragança é praticamente inexistente;
- A redução da percentagem de desconforto térmico de inverno entre os cenários “PosReab” e “Melhor” é bastante evidente em Lisboa e no Porto (redução de desconforto próxima de 30 %), e menos evidente em Bragança e Faro (14 % e 8 %, respetivamente).

Tal como efetuado na Categoria III, na Figura 5.25 apresenta-se a representação gráfica da percentagem de desconforto térmico de inverno, na Categoria II. A observação dos gráficos permite concluir que no Porto e em Bragança, na Categoria II, a percentagem de desconforto térmico de inverno é elevada para os 3 cenários estudados, pelo que se assume não ser possível haver conforto térmico de inverno nestes 2 locais, na categoria em análise, sem aquecimento ambiente. Em Lisboa é evidente uma redução considerável do desconforto térmico de inverno, na Categoria II, entre os

cenários “PosReab” e “Melhor”, o que leva a crer que a estratégia de reabilitação definida para o cenário “Melhor” conduz neste local a bons resultados. Em Faro, a percentagem de desconforto térmico dos cenários de melhor desempenho (“PosReab” e “Melhor”) é muito reduzida, o que permite concluir que o conforto térmico está garantido para ambos os cenários.

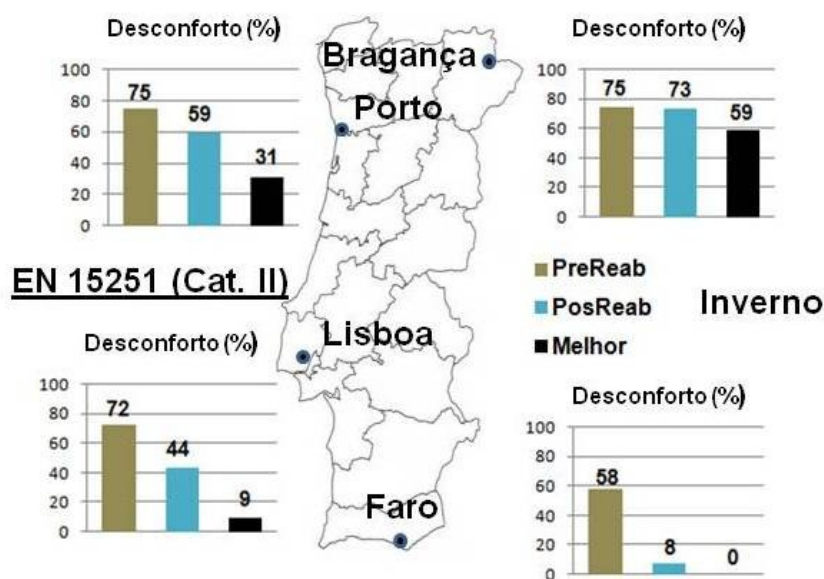


Figura 5.25 – Representação gráfica do desconforto térmico de inverno (Cat. II)

No gráfico da Figura 5.26 compara-se os valores do percentil 10 de temperatura do ar interior, T_{10} , no inverno, para as 4 localizações geográficas do território nacional, nos 3 cenários de simulação estudados.

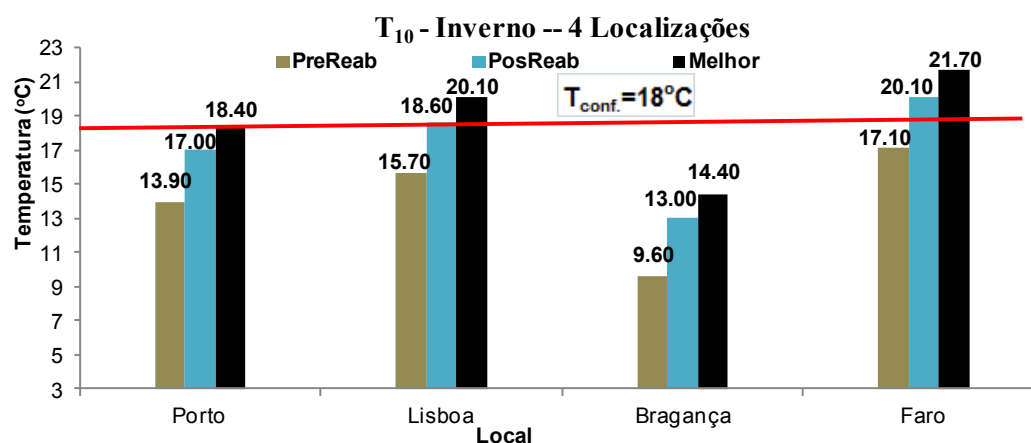


Figura 5.26 – Comparação dos valores de T_{10} no inverno

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.26 permite estabelecer os seguintes comentários:

- No cenário de menor desempenho térmico de inverno (cenário “PreReab”) o valor do percentil de temperatura, T_{10} , é particularmente reduzido em Bragança e no Porto, e bastante próximo da temperatura de conforto de 18°C (Categoria III), em Faro;
- Nos cenários de maior desempenho térmico de inverno (cenários “PosReab” e “Melhor”), o valor do percentil de temperatura, T_{10} , é superior à temperatura de conforto de 18°C , em Lisboa e em Faro. No Porto, o valor de T_{10} é inferior a 18°C , no cenário “PosReab”, e superior a 18°C , no cenário “Melhor”.

Na Figura 5.27 é efetuado a representação gráfica dos valores do percentil 10 de temperatura do ar interior, T_{10} , no inverno, para os 3 cenários de simulação estudados. Os valores de T_{10} dos cenários “PosReab” e “Melhor” são superiores à temperatura de conforto de 18 °C, em Lisboa e Faro, e bastante inferiores àquele valor, em Bragança. Para a Categoria III, conclui-se ser dispensável a adoção de aquecimento ambiente no inverno, em Lisboa e em Faro, e ser indispensável a existência de práticas de aquecimento do ar ambiente para obtenção do conforto térmico, em Bragança. No Porto, o valor de T_{10} é inferior a 18 °C no cenário “PosReab”, e superior àquele valor no cenário “Melhor”, pelo que se assume, na Categoria III, ser necessário haver pontualmente aquecimento do ar ambiente, para se obter conforto térmico.

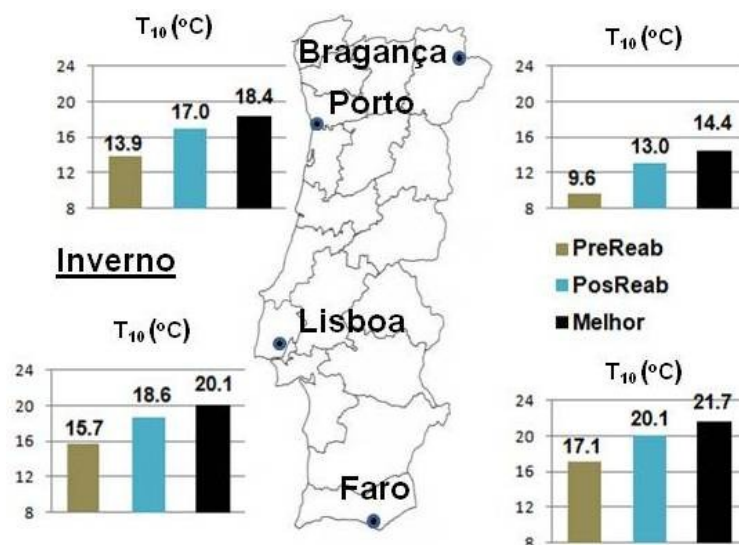


Figura 5.27 – Representação gráfica do valor de T_{10} no inverno

5.3.7.2. ANÁLISE COMPARATIVA DO CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO

Tal como efetuado no Capítulo 5.3.7.1 para o inverno, pretende-se estabelecer uma análise comparativa do desempenho térmico de verão entre os cenários de simulação estudados, nas 4 localizações geográficas do território nacional.

A análise efetuada envolve a comparação dos valores de 3 indicadores de desempenho calculados no estudo de sensibilidade desenvolvido nos Capítulos 5.3.2 e 5.3.3: a percentagem de desconforto de verão, nas Categorias II e III, o valor da frequência acumulada de temperatura (26 °C e 27 °C), e o valor percentil de temperatura, T_{90} , no verão.

O gráfico da Figura 5.28 estabelece uma comparação dos valores da percentagem de desconforto térmico na estação de arrefecimento, na Categoria III, para as 4 localizações geográficas do território nacional (Porto, Lisboa, Bragança e Faro), nos 3 cenários de simulação estudados (“PreReab”, “PosReab” e “Melhor”).

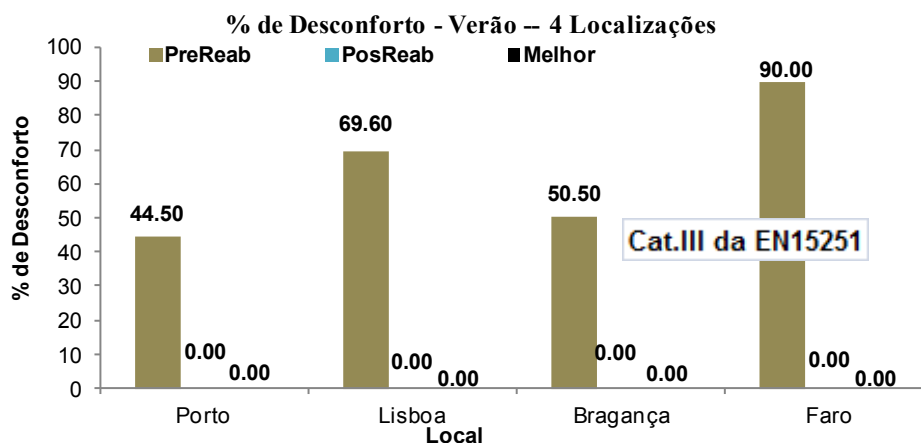


Figura 5.28 – Comparação dos valores do desconforto térmico de verão (Cat. III)

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 5.28 permitem sintetizar as seguintes conclusões:

- No cenário de menor desempenho térmico de verão (cenário “PreReab”) a percentagem de desconforto térmico é sempre superior a 50 %, na Categoria III, em 3 dos locais ensaiados. A exceção é o Porto, que apresenta uma percentagem de desconforto térmico inferior a 50 %. O clima ameno de verão no Porto proporciona valores de desconforto térmico mais baixos, mesmo para cenários de menor desempenho, como o indicado;
- Nos cenários de maior desempenho térmico de verão (cenários “PosReab” e “Melhor”) a percentagem de desconforto térmico é nula, na Categoria III, nos 4 locais.

Na Figura 5.29 apresenta-se a representação gráfica da percentagem de desconforto térmico de verão, na Categoria III, para os 3 cenários de simulação estudados. A percentagem de desconforto térmico de verão do cenário “PreReab” é particularmente elevada a sul de Portugal (Lisboa e Faro). Nos cenários “PosReab” e “Melhor” a percentagem de desconforto é nula em todas as localizações.

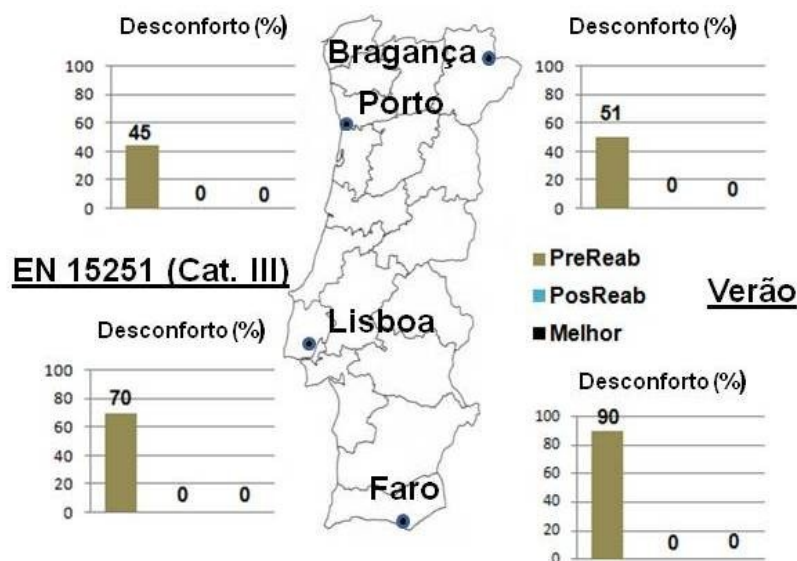


Figura 5.29 – Representação gráfica do desconforto térmico de verão (Cat. III)

Tal como representado para a Categoria III, o gráfico da Figura 5.30 estabelece uma comparação dos valores da percentagem de desconforto térmico na estação de arrefecimento, na Categoria II.

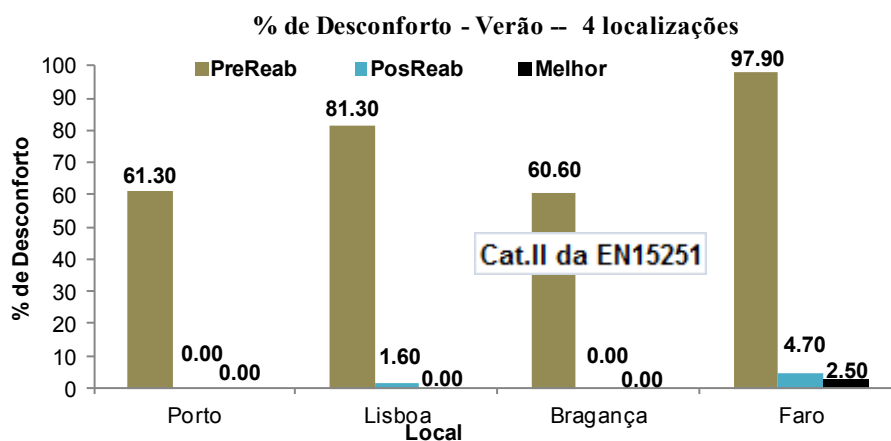


Figura 5.30 – Comparação dos valores do desconforto térmico de verão (Cat. II)

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 5.30 permitem sintetizar as seguintes conclusões:

- A percentagem de desconforto térmico de verão, no cenário “PreReab”, na Categoria II, é superior a 60 % em todas as localizações, com particular incidência para Lisboa e Faro;
- Nos cenários “PosReab” e “Melhor”, à semelhança do registado na Categoria III, a percentagem de desconforto térmico de verão é nula, ou quase nula. Em Faro e Lisboa, a percentagem de desconforto, na Categoria II, é inferior a 5 %.

De forma idêntica ao efetuado na Categoria III, na Figura 5.31 estabelece-se a representação gráfica da percentagem de desconforto térmico de verão, na Categoria II. A observação dos gráficos permite concluir que é possível haver conforto térmico de verão, em todo o país, na Categoria II, sem arrefecimento ambiente. No sul de Portugal a percentagem de desconforto nos cenários de melhor desempenho térmico de verão, não excede 5 %.

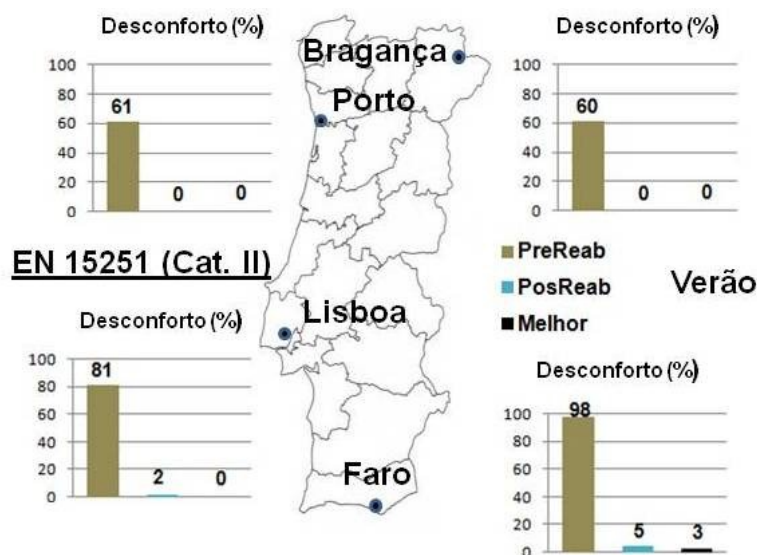


Figura 5.31 – Representação gráfica do desconforto térmico de verão (Cat. II)

Na Figura 5.32 é apresentado o estudo de frequências acumuladas para uma temperatura do ar interior, $T_{i,s}$, de 27 °C, para os 3 cenários em análise, nas 4 localizações. O gráfico representa a percentagem de horas da estação de arrefecimento em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor do limite de conforto especificado na Categoria III (27 °C).

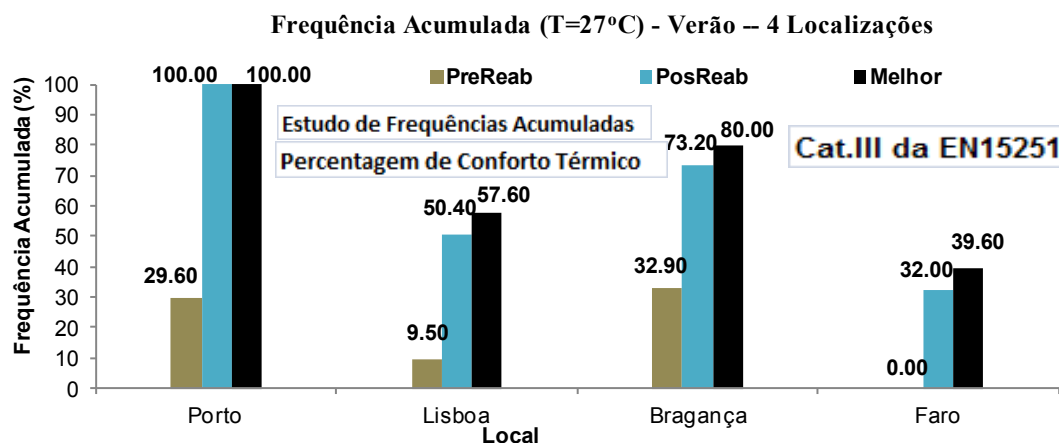


Figura 5.32 – Comparação dos valores das frequências acumuladas de temperatura ($T_i = 27^{\circ}\text{C}$)

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.32 permite estabelecer os seguintes comentários:

- No cenário de menor desempenho térmico de verão (“PreReab”), o desconforto térmico é generalizado para os 4 locais. Destaca-se a situação de Faro e Lisboa com o valor da percentagem de horas de desconforto superior a 90 %, para a Categoria III. No Porto e em Bragança o desconforto é inferior, contudo atinge ainda assim um valor superior a 70 % de horas de desconforto;
- Nos cenários de maior desempenho térmico de verão (“PosReab” e “Melhor”) há a destacar 3 situações diferenciadas: a relativa ao Porto, a Bragança, e a Lisboa e Faro. No Porto, a percentagem de horas de desconforto é nula, em Bragança é inferior a 30 %, e em Lisboa e Faro é superior a 50 %;
- O estudo de frequências acumuladas fornece resultados divergentes dos do estudo de conforto térmico de verão, estabelecido à luz da EN 15251. De acordo com a EN 15251, a percentagem de desconforto térmico de verão é nula para todos os locais do território nacional, enquanto o estudo de frequência acumuladas fornece resultados que configuram alargados períodos de desconforto térmico em Lisboa e Faro.

Na Figura 5.33 é apresentado o estudo de frequências acumuladas para uma temperatura do ar interior, T_i , de 26°C . O gráfico representa a percentagem de horas da estação de arrefecimento em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor do limite de conforto especificado na Categoria II (26°C).

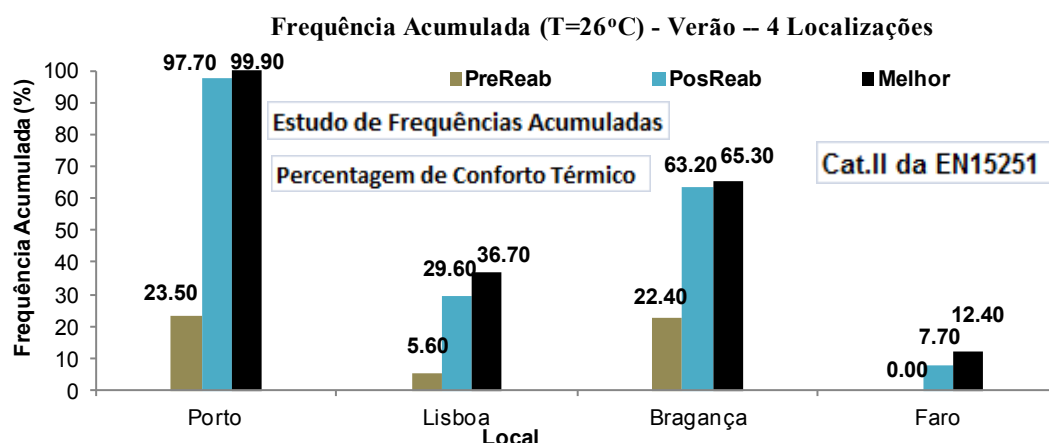


Figura 5.33 – Comparação dos valores das frequências acumuladas de temperatura ($T_i = 26^{\circ}\text{C}$)

A análise dos resultados apresentados no gráfico da Figura 5.33 reforça a ideia de que o estudo do conforto térmico de verão, estabelecido de acordo com o modelo de conforto adaptativo da EN 15251, conduz a valores “otimistas” da percentagem de desconforto. Se o estudo do conforto térmico à luz do modelo adaptativo da EN 15251, na Categoria II, fornece valores da percentagem de desconforto térmico, em Lisboa e Faro, inferiores a 5 %, o estudo de frequências acumuladas fornece valores da percentagem de desconforto próximos de 70 %, em Lisboa, e de 90 % em Faro.

O gráfico da Figura 5.34 estabelece uma comparação dos valores do percentil de temperatura do ar interior, T_{90} , no verão, para as 4 localizações geográficas do território nacional, nos 3 cenários de simulação selecionados. O estudo comparativo dos resultados permite concluir o seguinte:

- No cenário de menor desempenho térmico de verão (“PreReab”) o valor de T_{90} é superior a 30 °C, em todas as localizações do território nacional. Trata-se de um cenário de fraco desempenho térmico de verão, em todos os locais;
- Nos cenários de maior desempenho térmico de verão (cenários “PosReab” e “Melhor”), o valor de T_{90} é inferior ao valor da temperatura-limite de conforto, na Categoria III, apenas no Porto. Nas restantes localizações (Lisboa, Bragança e Faro), o valor excede o referido limite, incrementando o risco de sobreaquecimento na estação de arrefecimento.

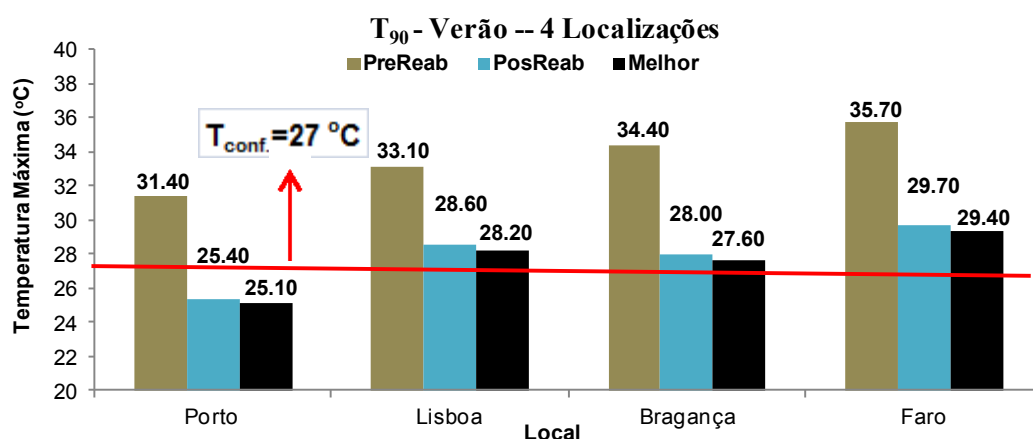


Figura 5.34 – Comparação dos valores de T_{90} no verão

Na Figura 5.35 é efetuada a representação gráfica dos valores do percentil 90 de temperatura do ar interior, T_{90} , no verão, para os 3 cenários de simulação estudados.

Os valores de T_{90} dos cenários “PosReab” e “Melhor”, em Bragança, Lisboa e Faro, são superiores à temperatura-limite de conforto de 27 °C, na Categoria III. No Porto, o valor de T_{90} é claramente inferior a 27 °C. O risco de sobreaquecimento é particularmente evidente em Lisboa e Faro, onde o valor de T_{90} , para os cenários de melhor desempenho, excede os 28 °C, temperatura indicada como referência para sua avaliação (CIBSE, 2008).

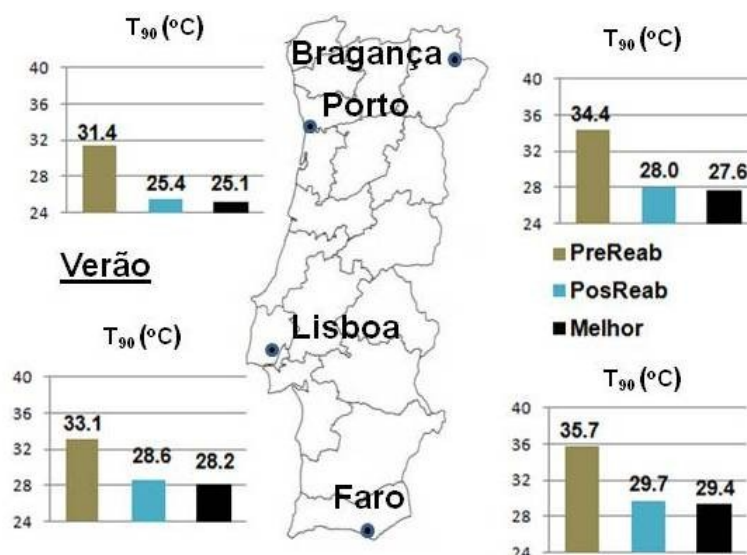


Figura 5.35 – Representação gráfica do valor de T_{90} no verão

5.3.7.3. ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO

Na sequência do estudo comparativo do desempenho térmico de inverno dos cenários de simulação estudados (Capítulo 5.3.7.1), estabelece-se, no presente capítulo, uma análise comparativa do consumo energético de aquecimento dos 3 cenários de simulação, nas 4 localizações geográficas do território nacional.

O gráfico da Figura 5.36 apresenta a comparação dos valores da energia de aquecimento, no inverno, na Categoria III, para as 4 localizações geográficas do território nacional (Porto, Lisboa, Bragança e Faro), nos 3 cenários de simulação estudados (“PreReab”, “PosReab” e “Melhor”).

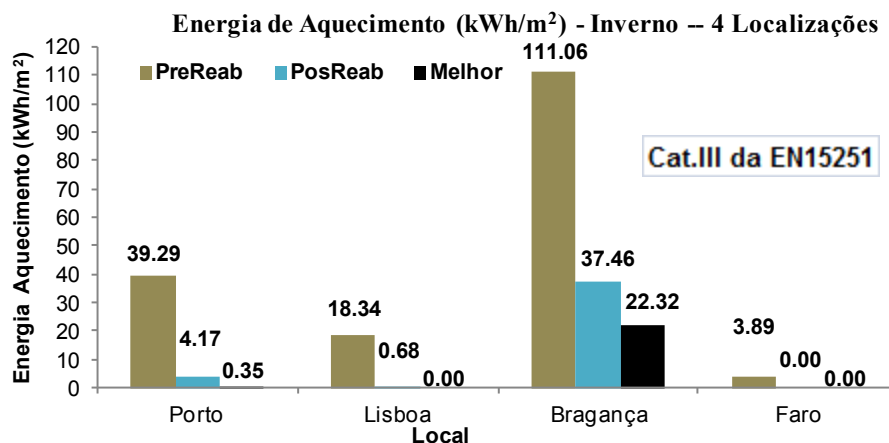


Figura 5.36 – Comparação dos valores da energia de aquecimento no inverno (Cat. III)

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.36 permite estabelecer os seguintes comentários:

- No cenário de menor eficiência energética de inverno (cenário “PreReab”), a energia de aquecimento, na Categoria III, apresenta valores bastante elevados em Lisboa e no Porto (18.34 kWh/m² e 39.29 kWh/m², respetivamente), e particularmente elevados em Bragança (cerca de 111 kWh/m²). Em Faro, mesmo num cenário de menor desempenho energético, o valor da energia de aquecimento é inferior a 4 kWh/m²;

- Nos cenários de maior eficiência energética de inverno (cenários “PosReab” e “Melhor”), o valor da energia de aquecimento, na Categoria III, em Lisboa e em Faro é quase nula, no Porto é inferior a 5 kWh/m². Em Bragança, o valor é próximo de 40 kWh/m².

Na Figura 5.37 apresenta-se a representação gráfica da energia de aquecimento no inverno, na Categoria III, para os 3 cenários de simulação estudados.

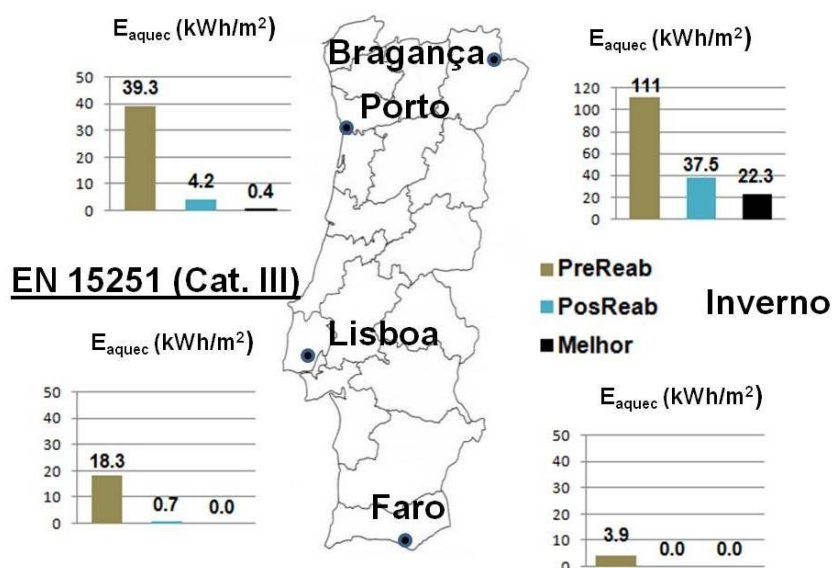


Figura 5.37 – Representação gráfica do valor da energia de aquecimento no inverno (Cat. III)

A representação gráfica apresentado na Figura 5.37 permite concluir que na Categoria III é possível ter conforto térmico de inverno sem aquecimento do ar ambiente, em Lisboa e Faro. No Porto o valor do aquecimento ambiente necessário à obtenção do conforto é residual (4.2 kWh/m², no cenário “PosReab”, e 0.4 kWh/m², no cenário “Melhor”), e em Bragança é bastante elevado (37.5 kWh/m², no cenário “PosReab”, e 22.3 kWh/m², no cenário “Melhor”).

Tal como efetuado na Categoria III, no gráfico da Figura 5.38 são comparados os valores da energia de aquecimento, na Categoria II.

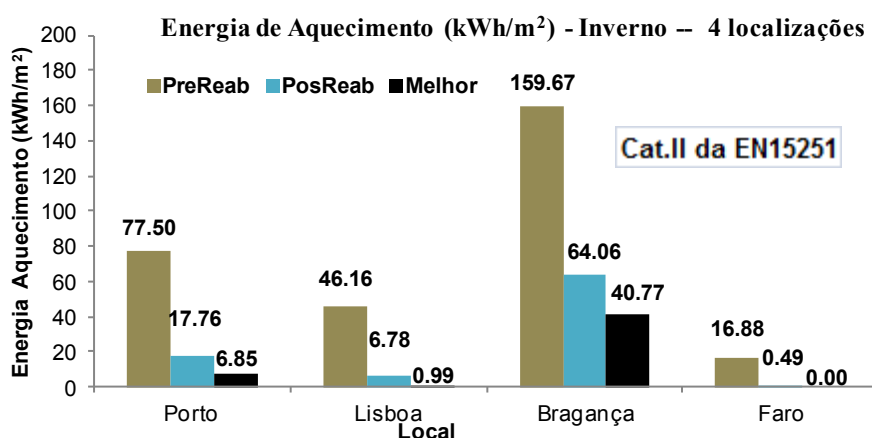


Figura 5.38 – Comparação dos valores da energia de aquecimento no inverno (Cat. II)

O valor da energia de aquecimento nos cenários “PosReab” e “Melhor”, na Categoria II, em Lisboa e Faro, é reduzido. Em Lisboa é próximo de 7 kWh/m² e em Faro é quase nulo. No Porto, o valor é próximo de 18 kWh/m² e em Bragança excede 150 kWh/m².

O gráfico da Figura 5.39 apresenta a representação gráfica da energia de aquecimento no inverno, na Categoria II, para os 3 cenários de simulação estudados.

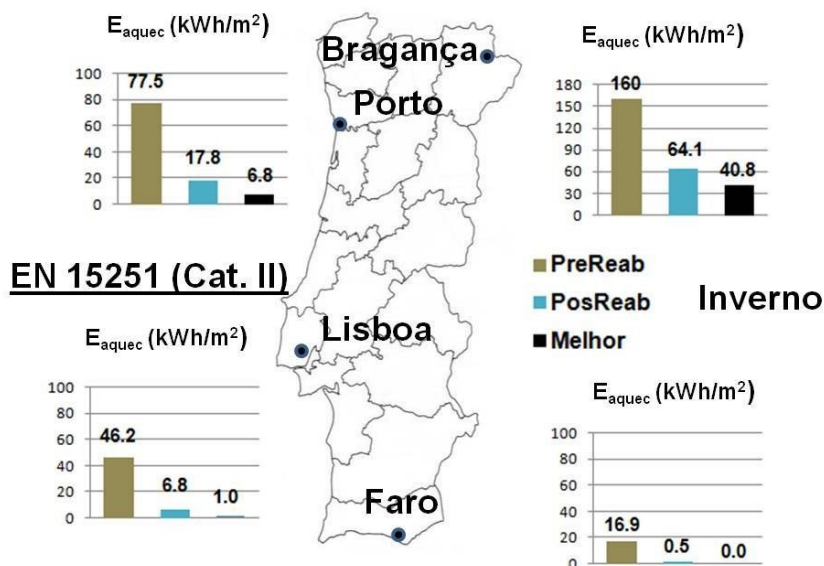


Figura 5.39 – Representação gráfica do valor da energia de aquecimento no inverno (Cat. II)

A representação gráfica apresentada na Figura 5.39 destaca a necessidade de aquecimento do ar ambiente, na Categoria II, para a obtenção do conforto térmico em Bragança, Porto e Lisboa. Em Faro, tanto para a Categoria II como para a Categoria III, dispensa-se o recurso à utilização de aquecimento ambiente para garantir o conforto térmico de inverno.

5.3.7.4. ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO

Na sequência do estudo comparativo do desempenho térmico de verão dos 3 cenários de simulação estudados, desenvolvido no Capítulo 5.3.7.2, estabelece-se, no presente capítulo, uma análise comparativa do consumo energético de arrefecimento dos 3 cenários de simulação, nas 4 localizações geográficas do território nacional.

O gráfico da Figura 5.40 apresenta a comparação dos valores da energia de arrefecimento, no verão, na Categoria III, para as 4 localizações geográficas do território nacional (Porto, Lisboa, Bragança e Faro), nos 3 cenários de simulação estudados (“PreReab”, “PosReab” e “Melhor”).

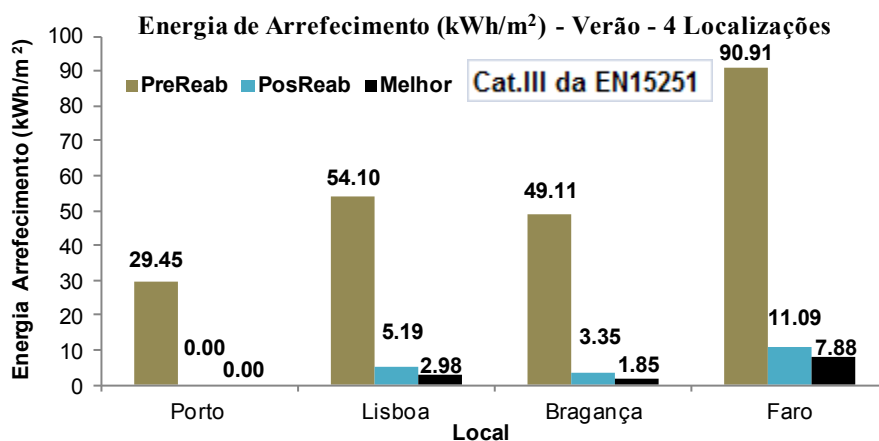


Figura 5.40 – Comparação dos valores da energia de arrefecimento no verão (Cat. III)

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.40 permite estabelecer os seguintes comentários:

- No cenário de menor eficiência energética de verão (cenário “PreReab”), na Categoria III, o valor da energia de arrefecimento é superior a 25 kWh/m², em todas as localizações. O cenário apresenta um baixo desempenho energético de verão;
- Nos cenários de maior eficiência energética de verão (cenários “PosReab” e “Melhor”), o valor da energia de arrefecimento é nula no Porto. Em Lisboa e em Bragança é inferior a 5 kWh/m², e em Faro atinge um valor que não excede 12 kWh/m².

Na Figura 5.41 apresenta-se a representação gráfica da energia de arrefecimento no verão, na Categoria III, para os 3 cenários de simulação estudados.

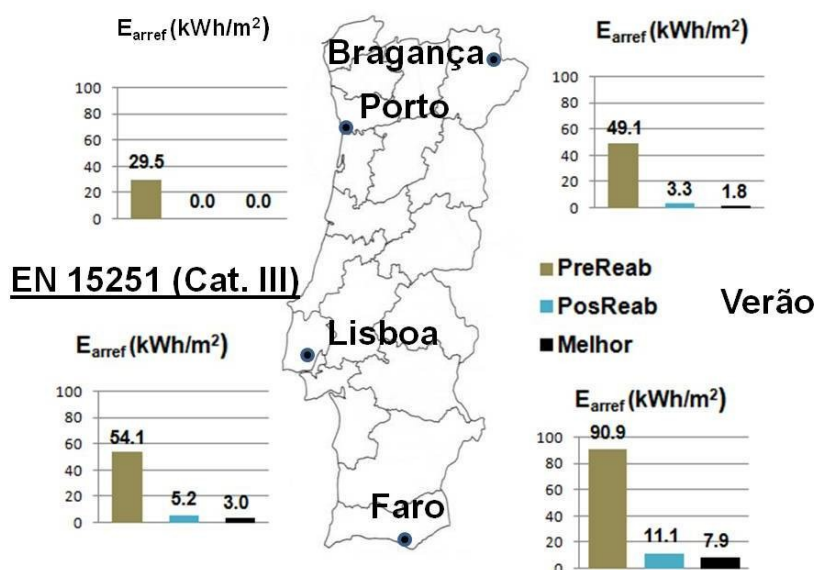


Figura 5.41 – Representação gráfica do valor da energia de arrefecimento no verão (Cat. III)

A representação gráfica apresentada na Figura 5.41 permite concluir que na Categoria III, apenas é possível ter conforto térmico de verão, sem necessidade de arrefecimento do ar ambiente, no Porto. Em Lisboa e Bragança é necessário proceder ao arrefecimento do ar ambiente, muito embora a energia de arrefecimento necessária à obtenção do conforto térmico seja reduzida (inferior a 6 kWh/m²). Em Faro, o valor da energia de arrefecimento necessária ao conforto térmico atinge um valor mais elevado, que no entanto não excede 12 kWh/m².

Tal como efetuado na Categoria III, no gráfico da Figura 5.42 são comparados os valores da energia de arrefecimento, na Categoria II.

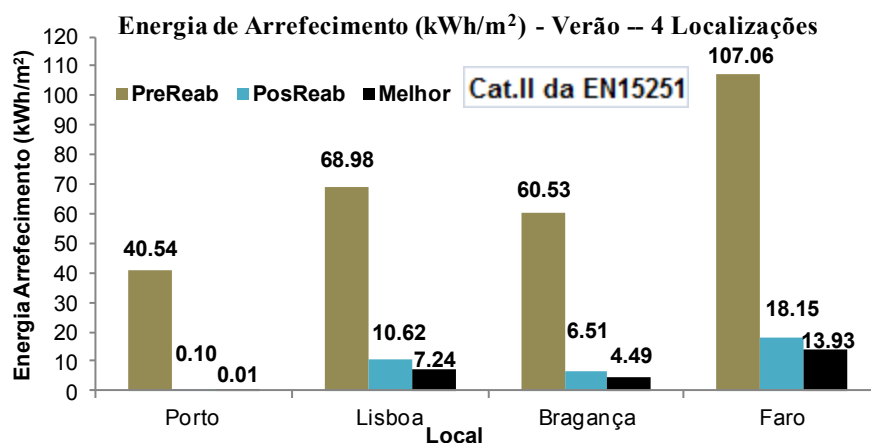


Figura 5.42 – Comparação dos valores da energia de arrefecimento no verão (Cat. II)

O valor da energia de arrefecimento nos cenários “PosReab” e “Melhor”, na Categoria II, é elevado em Faro (superior a 12 kWh/m²). Em Lisboa e Bragança não excede 12 kWh/m² e é quase nulo no Porto.

O gráfico da Figura 5.43 apresenta a representação gráfica da energia de arrefecimento no verão, na Categoria II, para os 3 cenários de simulação estudados.

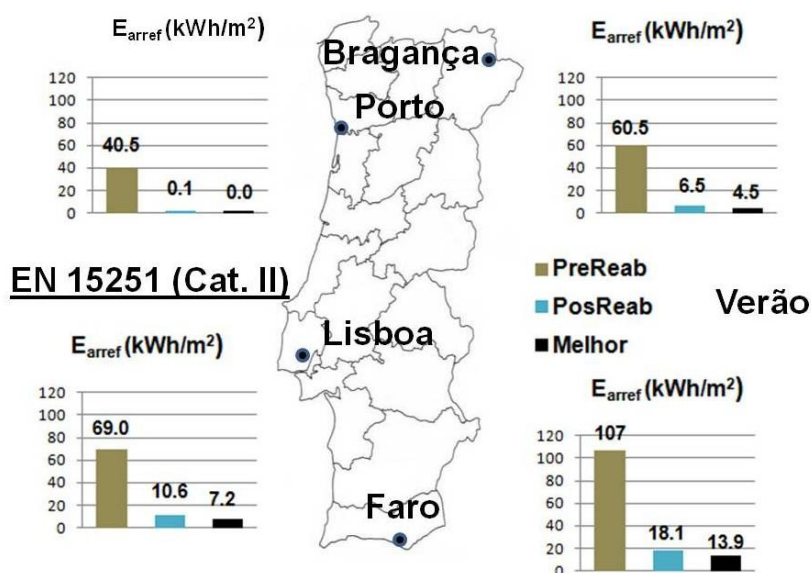


Figura 5.43 – Representação gráfica do valor da energia de arrefecimento no verão (Cat. II)

Na representação gráfica apresentada na Figura 5.43 é evidente a necessidade de arrefecimento do ar ambiente, na Categoria II, em Lisboa, Bragança e Faro. No Porto, tanto para a Categoria II como para a Categoria III, dispensa-se o recurso à utilização de arrefecimento ambiente para garantir o conforto térmico de verão.

5.4. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um estudo de sensibilidade para 3 cenários selecionados (cenários “PreReab”, “PosReab”, “Melhor”), em 4 localizações geográficas do território nacional, que avaliou o conforto térmico e a eficiência energética da zona térmica Z6 (quarto de dormir) do Apartamento-Tipo (apartamento de tipologia T3, tipologia dominante do conjunto habitacional, ocupado por 5 residentes, implantado no 4.º piso do edifício), no inverno e no verão.

A avaliação do conforto térmico foi estabelecida com aplicação do modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007) que preconiza, em traços gerais, duas categorias de conforto. A Categoria II, aplicável a edifícios novos, e a Categoria III, aplicável a edifícios reabilitados. De forma complementar, para aprofundar o estudo do conforto térmico, foram calculados os percentis de temperatura do ar interior e efetuado o estudo das frequências acumuladas de temperatura.

A avaliação do desempenho energético foi estabelecida pelo cálculo do valor da energia de aquecimento e de arrefecimento do ar ambiente necessária à obtenção do conforto térmico.

No final do Capítulo foi efetuado o estudo comparativo do conforto térmico e do consumo energético dos 3 cenários estudados, nas 4 localizações geográficas, e foi estabelecida a representação gráfica, no mapa de Portugal, de um conjunto de indicadores de avaliação do desempenho térmico e energético.

O estudo do conforto térmico e dos consumos energéticos foi desenvolvido para as duas categorias da EN 15251, no entanto as conclusões são obtidas com base na Categoria III, aplicável a edifícios de habitação social reabilitados.

Os resultados assim obtidos permitem sintetizar as seguintes conclusões:

- 1) O conforto térmico de inverno, à luz do modelo adaptativo da EN 15251, no cenário “PosReab”, em regime de livre variação de temperatura, é distinto consoante a sua localização geográfica. Em Bragança, a percentagem de desconforto térmico de inverno é superior a 50 %, no Porto e em Lisboa, é inferior a 20 % e em Faro é nula.** Em qualquer das localizações, a reabilitação do edifício permitiria um reforço considerável do conforto térmico de inverno. Refira-se, a propósito, que o cenário pré-reabilitação (cenário “PreReab”) apresenta, com exceção de Faro, uma percentagem de desconforto térmico superior a 50 %;
- 2) O conforto térmico de verão, à luz do modelo adaptativo da EN 15251, no cenário “PosReab”, em regime de livre variação de temperatura, está garantido para as 4 localizações geográficas, com percentagens nulas de desconforto.** Coloca-se, no entanto, algumas reservas relativamente à aplicação do modelo adaptativo da EN 15251 no estudo do conforto térmico de verão. Muito embora as percentagens de desconforto térmico, na Categoria III, sejam nulas para as 4 localizações, o estudo de frequências acumuladas revela valores de percentagem de horas de desconforto, para uma temperatura-limite de 27 °C (valor limite de admissibilidade especificado pela EN 15251) superiores a 50 % para Lisboa e Faro;
- 3) O consumo energético de aquecimento, no cenário “PosReab”, para garantir uma temperatura mínima de conforto de 18 °C, é inferior a 5 kWh/m² no Porto, quase nula em Lisboa e em Faro, e próximo de 40 kWh/m² em Bragança.** A reabilitação do edifício permitiu um acréscimo da sua eficiência energética. No cenário “PreReab”, o consumo energético de aquecimento é de cerca de 40 kWh/m² no Porto, 18 kWh/m² em Lisboa, 111 kWh/m² em Bragança e cerca de 4 kWh/m² em Faro;
- 4) O consumo energético de arrefecimento, no cenário “PosReab”, para garantir uma temperatura-limite de conforto de 27 °C, é nulo, no Porto, cerca de 5 kWh/m², em Lisboa e Bragança, e próximo de 11 kWh/m² em Faro.** Tal como para o inverno, a reabilitação do edifício permitiu um acréscimo da sua eficiência energética de verão. No cenário “PreReab”, o consumo energético de arrefecimento é superior a 30 kWh/m² em todas as localizações;
- 5) Foi comparado o cenário “PosReab” com o cenário “Melhor”, que prevê a aplicação de 8 cm isolamento térmico na fachada opaca e de 14 cm na cobertura. Na Categoria III, o cenário “Melhor” introduz uma melhoria do desempenho térmico de inverno em Bragança e no Porto, com a redução do valor da percentagem de desconforto e da energia de aquecimento. Em

Bragança, a percentagem de desconforto de inverno é reduzida de 55 % para 41 %, enquanto no Porto, é reduzida de 19 % para 5 %. A energia de aquecimento, em Bragança, é reduzida de 37.5 kWh/m² para 22.3 kWh/m², e no Porto de 4.2 kWh/m² para 0.4 kWh/m². No verão, a alteração do cenário “PosReab” para o cenário “Melhor”, não introduz melhorias significativas do conforto térmico e da eficiência energética nos 4 locais;

6) A representação gráfica dos resultados do estudo de conforto térmico e dos consumos energéticos dos cenários estudados (“PreReab”, “PosReab” e “Melhor”) permitiu analisar, de forma comparativa, o desempenho térmico e a eficiência energética das estratégias de reabilitação por eles traduzidas. Do estudo efetuado sintetizam-se as seguintes conclusões:

a) A reabilitação construtiva do edifício, nos moldes definidos no Capítulo 3, permitiria melhorar o desempenho térmico e energético do Apartamento-Tipo, no inverno e no verão, nas 4 localizações geográficas estudadas;

b) Na Categoria III é possível ter conforto térmico de inverno sem aquecimento do ar ambiente, em Lisboa e Faro. No Porto, o valor do aquecimento ambiente necessário à obtenção do conforto térmico é inferior a 5 kWh/m² e em Bragança próximo de 40 kWh/m²;

c) Na Categoria III é possível ter conforto térmico de verão, sem arrefecimento do ar ambiente, no Porto. Em Lisboa e Bragança, o valor do arrefecimento ambiente necessário à obtenção do conforto térmico é inferior a 6 kWh/m² e em Faro próximo de 11kWh/m².

7) As conclusões sintetizadas nos pontos 1) a 6) têm como suporte o estudo do Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional de Lordelo. Trata-se de um apartamento de tipologia T3 (5 residentes), com uma área de 60 m², localizado no último piso do edifício e que confina lateralmente com 2 apartamentos. **O facto de o volume de ar por ocupante ser reduzido (30 m³/ocupante) e de os ganhos internos serem elevados (Capítulo 4.5.6.2) favorece a existência de baixos valores da energia de aquecimento.**

6

INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO DAS PAREDES E DA VENTILAÇÃO NOTURNA NO CONFORTO E NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

6.1. ENQUADRAMENTO

Caracterizado o desempenho da solução pós-reabilitação em 4 locais do país, pretende-se avaliar o efeito do reforço do isolamento térmico da fachada opaca do edifício e da ventilação noturna, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional estudado.

Para tal foram estudadas um conjunto de soluções de reabilitação da fachada opaca e da ventilação noturna do edifício, que por comparação com a solução correspondente ao edifício reabilitado (cenário de simulação numérica “PosReab” do Capítulo 5), tornou possível responder a um conjunto de questões formuladas nos Capítulos 6.2, 6.3 e 6.4. A resposta às questões formuladas ajudou a definir uma estratégia de reabilitação das fachadas dos edifícios de habitação social, e a avaliar os benefícios da ventilação noturna neste tipo de edifícios, em 4 localizações representativas do território nacional.

Para avaliar o desempenho térmico das soluções de reabilitação estudadas, desenvolveu-se um indicador que quantifica o desconforto térmico de inverno e de verão, e que permite estabelecer uma análise comparativa entre soluções, nos 4 locais do país.

No final do Capítulo 6 sintetizaram-se um conjunto de recomendações que visam reabilitações futuras. As recomendações estabelecidas têm em vista incrementar o conforto térmico e a eficiência energética na reabilitação dos edifícios de habitação social, face aos constrangimentos de carácter económico que limitam drasticamente os custos no contexto socioeconómico atual.

A estrutura do Capítulo 6 segue a seguinte metodologia:

- Avaliou-se a influência do coeficiente de transmissão térmica da fachada opaca no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo, tendo para o efeito sido estudadas 3 soluções de reforço do isolamento, correspondentes à aplicação de espessuras crescente de isolamento térmico (4 cm, 8 cm e 12 cm de XPS) pelo exterior da fachada opaca. Estabeleceu-se uma análise comparativa entre a solução referente ao edifício reabilitado, com a fachada opaca não isolada, e as 3 soluções de isolamento térmico pelo exterior, consideradas para o efeito;

- Avaliou-se a influência do isolamento térmico pelo interior da fachada opaca, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo. Para tal, foi estudada uma solução de isolamento da fachada opaca pelo seu interior, com a aplicação de 4 cm de XPS, e comparou-se os resultados assim obtidos com os da solução referente ao edifício reabilitado com a fachada opaca não isolada;
- Avaliou-se a influência da ventilação noturna do Apartamento-Tipo no conforto térmico e na eficiência energética de verão. Na solução referente ao edifício reabilitado, introduziu-se no período noturno, na estação de arrefecimento, uma taxa de renovação horária de 5 h^{-1} . Foram comparados os resultados entre a solução referente ao edifício reabilitado, sem ventilação noturna, e a solução com ventilação noturna, e quantificado o seu efeito benéfico no conforto térmico de verão e na eficiência energética do Apartamento-Tipo;
- Calculou-se o Indicador de Desconforto Térmico ($D_{x,y}$) para as soluções de reabilitação estudadas, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional, e procedeu-se à sua representação gráfica no mapa de Portugal;
- Foram definidas um conjunto de recomendações relativas ao isolamento térmico das fachadas opacas e à ventilação noturna, a considerar em futuras ações de reabilitação de edifícios de habitação social.

6.2. INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA FACHADA

6.2.1. OBJETIVOS

Para avaliar a influência do coeficiente de transmissão térmica, U , da fachada opaca, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo, no inverno e no verão, foram estudadas 3 soluções de reforço do isolamento da fachada opaca, obtidas por aplicação de espessuras crescentes de isolamento térmico (4 cm, 8 cm e 12 cm, respetivamente). Para implementação das 3 soluções de reforço do isolamento da fachada opaca foram criados 3 cenários de simulação numérica correspondentes à aplicação pelo exterior da fachada opaca de 4 cm, 8 cm e 12 cm de XPS ($U = 0.54$, 0.34 e $0.25 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, respetivamente) cujos resultados foram comparados com os do cenário “PosReab” (Capítulo 5), o qual traduz a solução correspondente ao edifício reabilitado, sem aplicação de isolamento térmico na fachada opaca ($U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$).

O estudo comparativo pretende dar resposta às seguintes questões:

- Numa ação de reabilitação da fachada de um edifício de habitação social, onde sabemos serem reduzidas, ou mesmo nulas, as práticas de aquecimento ambiente, qual deverá ser o nível de isolamento térmico da fachada opaca?
- Será que o aumento da espessura de isolamento térmico na fachada opaca do edifício se traduz, de acordo com o seria expectável, num incremento do conforto térmico e da eficiência energética dos apartamentos, mesmo sem aquecimento do ar ambiente?

6.2.2. CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO

Os gráficos da Figura 6.1 traduzem o estudo do conforto térmico do Apartamento-Tipo na estação de aquecimento, em 4 locais representativos do território nacional (Porto, Lisboa, Bragança e Faro), à luz da EN 15251, para as 4 soluções que se pretendem comparar: a solução referente ao edifício reabilitado sem aplicação de isolamento na fachada ($U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) e as 3 soluções referentes ao

edifício reabilitado, com aplicação de 3 espessuras de isolamento térmico pelo exterior da fachada opaca, 4cm, 8cm e 12cm de XPS ($U = 0.54$, 0.34 , e $0.25 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, respetivamente).

Os gráficos descritos representam os resultados horários de simulação numérica, na estação de aquecimento, no Porto, em Lisboa, Bragança e Faro, para as 4 soluções de reabilitação da fachada opaca. Os pontos representativos da solução com 12 cm de XPS pelo exterior da fachada opaca ($U = 0.25 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) estão sobrepostos aos referentes às restantes soluções, o que configura percentagens de desconforto térmico de inverno muito idênticas para as 4 soluções estudadas.

Em Faro e Lisboa, os resultados obtidos estão na sua maior parte enquadrados dentro da banda referente ao intervalo de conforto, nas Categorias II e III, enquanto no Porto e em Bragança, a mancha gráfica está parcialmente deslocada para baixo das retas que representam o limite inferior de conforto (Figura 6.1).

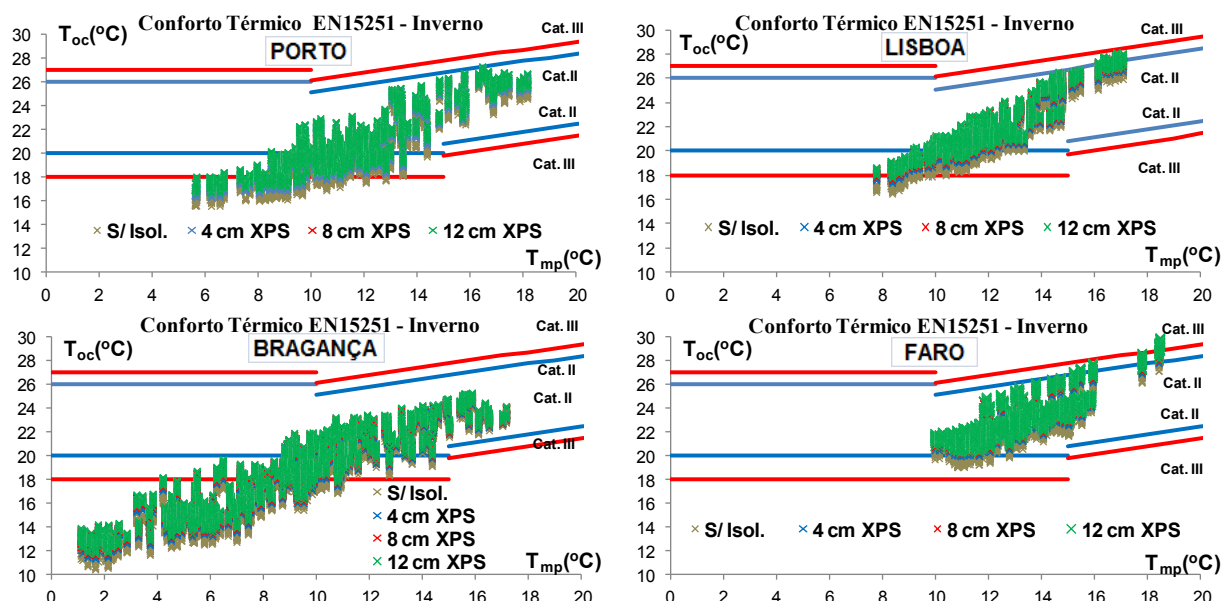


Figura 6.1 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento – 4 soluções de U

O Quadro 6.1 apresenta o número de horas de desconforto térmico e as percentagens de desconforto na estação de aquecimento, das 4 soluções estudadas, nos 4 locais do território nacional. Os resultados referem-se às Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007).

A variação da percentagem de desconforto térmico, na categoria III, entre as soluções referentes ao edifício reabilitado sem isolamento térmico na fachada opaca (solução com $U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$), e a referente à aplicação de 12 cm de XPS pelo exterior ($U = 0.25 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) é muito reduzida nas 4 localizações. No Porto a diferença é de 9.7 %, em Lisboa de 4.6 %, em Bragança de 11.2 % e em Faro é nula. Nos cenários intermédios de isolamento térmico (4 cm e 8 cm de XPS, com $U = 0.54$ e $0.34 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, respetivamente), a diferença entre percentagem de desconforto térmico para os 4 locais é ainda menor, não ultrapassando 2 %.

Na Categoria II, a variação da percentagem de desconforto térmico entre as soluções sem isolamento térmico ($U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) e com 12 cm XPS ($U = 0.25 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) é mais elevada para duas das localizações simuladas (Porto e Lisboa). No Porto a diferença é de 21 % e em Lisboa de 29.4 %. Em Bragança e em Faro é de 8.6 % e de 7.7 %, respetivamente. Nos cenários intermédios de isolamento (4 cm e 8 cm de XPS, com $U = 0.54$ e $0.34 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, respetivamente), a diferença entre a percentagem de desconforto térmico é reduzida, não ultrapassando 8 % para os 4 locais.

Em síntese, refere-se que na Categoria III, a redução do desconforto térmico, com o aumento da espessura do isolamento pelo exterior da fachada, atinge um valor máximo de 11.2 %. Na Categoria II, essa redução atinge um valor máximo de 29.4 %. De salientar que em Bragança e em Faro, localização mais severa e menos severa de inverno, respetivamente, a redução do desconforto térmico com o aumento da espessura do isolamento das fachadas, é reduzida para as duas categorias (11.2 % e 8.6 % para Bragança, e 0.0 % e 7.7 % para Faro).

Quadro 6.1 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento – 4 soluções de U

Local	Estação Aquecimento (M/h)	Solução	Desconforto (h) Cat. III	Desconforto (h) Cat. II	% Cat. III	% Cat. II
Porto	6.7 m / 4848h	S/ Isol.	912	2876	18.8	59.3
		4 cm XPS	619	2188	12.8	45.1
		8 cm XPS	501	1963	10.3	40.5
		12 cm XPS	441	1858	9.1	38.3
Lisboa	5.3 m / 3888h	S/ Isol.	183	1704	4.7	43.8
		4 cm XPS	38	905	1.0	23.3
		8 cm XPS	9	657	0.2	16.9
		12 cm XPS	5	558	0.1	14.4
Bragança	8 m / 5832h	S/ Isol.	3207	4272	55.0	73.3
		4 cm XPS	2723	3915	46.7	67.1
		8 cm XPS	2599	3821	44.6	65.5
		12 cm XPS	2554	3772	43.8	64.7
Faro	4.3 m / 3120h	S/ Isol.	0	239	0.0	7.7
		4 cm XPS	0	2	0.0	0.1
		8 cm XPS	0	0	0.0	0.0
		12 cm XPS	0	0	0.0	0.0

Um outro indicador que permite comparar o desempenho relativo das 4 soluções de isolamento térmico da fachada opaca estudadas, é o valor da temperatura mínima do ar interior, T_{min} , no Apartamento-Tipo. O gráfico da Figura 6.2 representa o valor mensal de T_{min} em 3 meses da estação de aquecimento (dezembro, janeiro e fevereiro), nos 4 locais simulados, da solução referente ao edifício reabilitado sem isolamento térmico na fachada, e das soluções com 4 cm, 8 cm e 12 cm de XPS pelo seu exterior ($U = 0.54, 0.34$ e $0.25 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, respetivamente). A diferença entre o valor da temperatura mínima, em regime de livre variação de temperatura, das soluções com 12 cm XPS e sem isolamento térmico na fachada, é reduzida. Vale 1.3°C no Porto, 1.37°C em Lisboa, 1.33°C em Bragança e 1.37°C em Faro. Nos cenários intermédios de isolamento (4 cm e 8 cm de XPS, com $U = 0.54$ e $0.34 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, respetivamente), a diferença para os 4 locais não excede 0.3°C .

Em face dos resultados obtidos constata-se que o aumento da espessura do isolamento térmico da fachada opaca do edifício reabilitado não se traduziria num aumento expressivo do valor da temperatura mínima do ar interior. Esse valor não ultrapassaria, no melhor dos cenários, um valor de 1.37°C . O único local cujo valor de T_{min} excede o limite inferior de conforto de 18°C (Categoria III) é Faro.

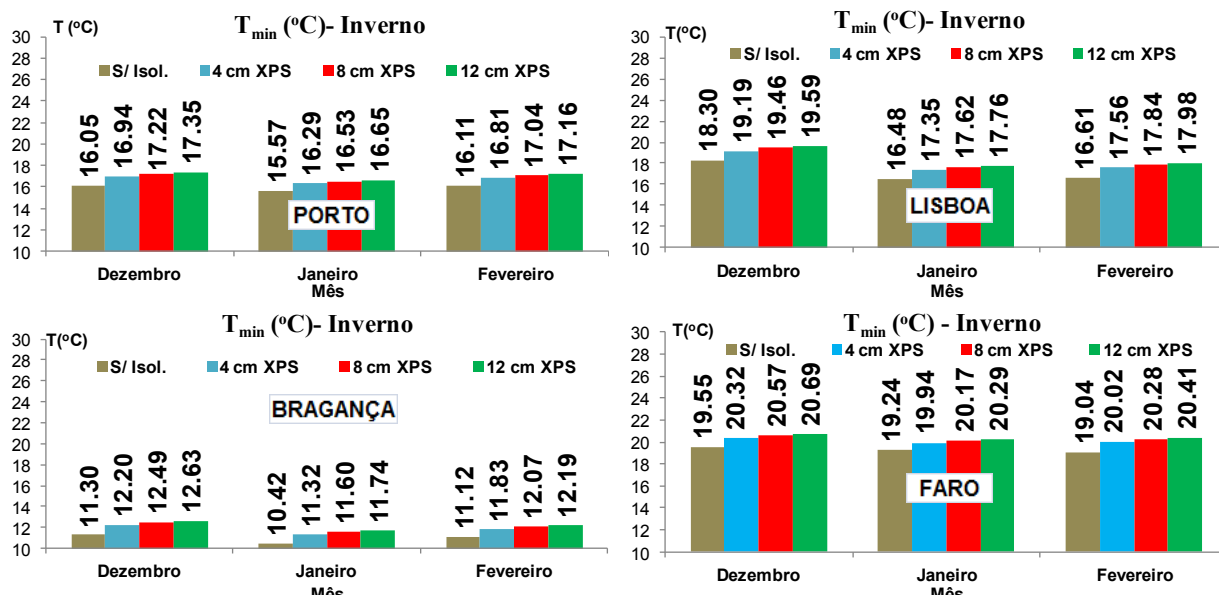


Figura 6.2 – Temperatura mínima mensal na estação de aquecimento – 4 soluções de U

6.2.3. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO

À semelhança do efetuado para a estação de aquecimento, os gráficos da Figura 6.3 traduzem o estudo do conforto térmico do Apartamento-Tipo na estação de arrefecimento (1 de junho a 30 de setembro), nos 4 locais representativos do território nacional, à luz da EN 15251, para as 4 soluções de coeficiente de transmissão térmica da fachada opaca ($U = 1.30, 0.54, 0.34$ e $0.25 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, respetivamente). No verão é evidente, um desempenho térmico muito aproximado, entre as 4 soluções estudadas, traduzido pela sobreposição dos resultados representados na Figura 6.3. No Porto e em Bragança, os pontos estão abaixo das retas que traduzem o limite de conforto para as Categorias II e III, enquanto em Lisboa e Faro é evidente uma percentagem elevada de pontos acima do limite de conforto referente à Categoria II.

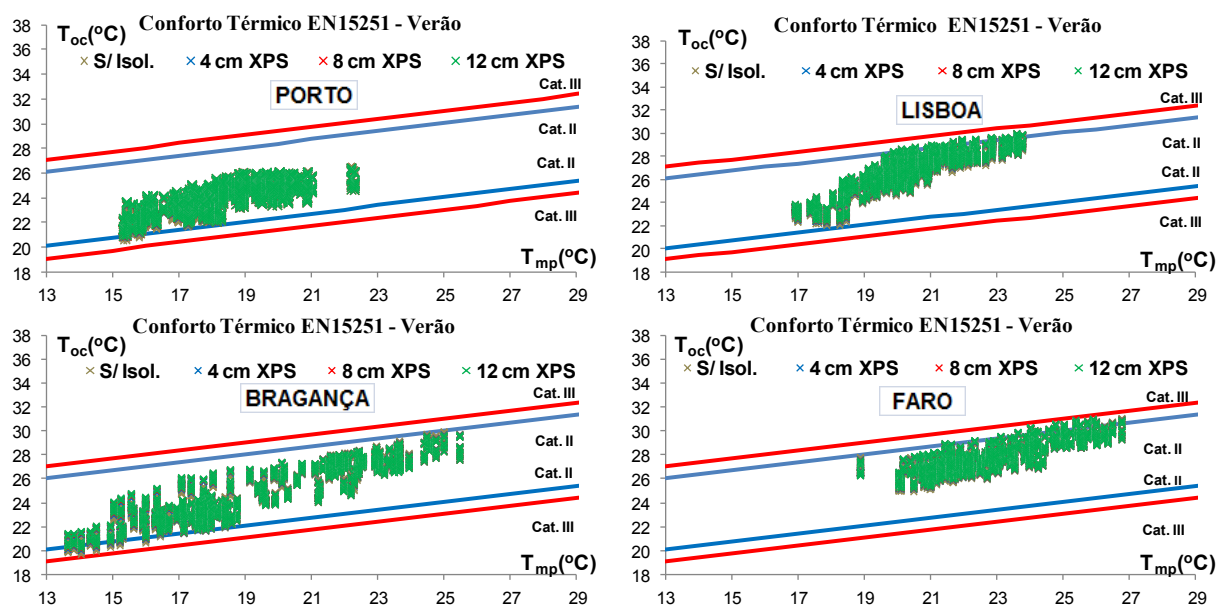


Figura 6.3 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – 4 soluções de U

O número de horas de desconforto térmico ao longo da estação de arrefecimento, e as respetivas percentagens de desconforto, face ao número total de horas da estação, encontra-se representado no Quadro 6.2. Os resultados referem-se às Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007).

Da sua análise, constata-se, que na Categoria III, não há desconforto térmico de verão nos 4 locais. As percentagens de desconforto térmico são nulas para as 4 soluções de isolamento térmico da fachada opaca (sem isolamento, 4 cm XPS, 8 cm XPS, 12 cm XPS).

Na Categoria II, as percentagens de desconforto térmico de verão são idênticas no Porto, em Bragança e em Faro, para as 4 soluções de isolamento da fachada opaca. Em Lisboa, à medida que aumenta a espessura de isolamento da fachada opaca, aumenta a percentagem de desconforto térmico. A percentagem de desconforto térmico é de 1.6 % para a solução sem isolamento térmico ($U = 1.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), 4.0 % para 4 cm XPS ($U = 0.54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), 5.1 % para 8 cm XPS ($U = 0.34 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e de 6.0 % para a solução com 12 cm XPS ($U = 0.25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Em face dos resultados obtidos constata-se que não há benefício, no desempenho térmico de verão, com a aplicação de isolamento da fachada opaca pelo exterior. De acordo com os resultados pode inclusive, no sul de Portugal (Lisboa e Faro), ser contraproducente aumentar a espessura do isolamento, sob pena de se aumentar a percentagem de desconforto térmico de verão.

Quadro 6.2 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – 4 soluções de U

Local	Estação Arrefecimento (M/h)	Solução	Desconforto (h) Cat. III	Desconforto (h) Cat. II	% Cat. III	% Cat. II
Porto	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	0	0	0.0%	0.0%
		4 cm XPS	0	0	0.0%	0.0%
		8 cm XPS	0	0	0.0%	0.0%
		12 cm XPS	0	0	0.0%	0.0%
Lisboa	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	0	46	0.0%	1.6%
		4 cm XPS	0	116	0.0%	4.0%
		8 cm XPS	0	149	0.0%	5.1%
		12 cm XPS	0	175	0.0%	6.0%
Bragança	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	0	0	0.0%	0.0%
		4 cm XPS	0	0	0.0%	0.0%
		8 cm XPS	0	0	0.0%	0.0%
		12 cm XPS	0	0	0.0%	0.0%
Faro	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	0	139	0.0%	4.7%
		4 cm XPS	0	141	0.0%	4.8%
		8 cm XPS	0	146	0.0%	5.0%
		12 cm XPS	0	147	0.0%	5.0%

Um indicador adequado para avaliar o desconforto térmico de verão é a frequência acumulada da temperatura do ar interior, que traduz a percentagem de horas da estação de arrefecimento, face ao número total de horas, em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor limite de conforto especificado nas Categorias II e III da EN 15251 (26 °C e 27 °C, respetivamente).

No Quadro 6.3 apresentam-se as frequências acumuladas da temperatura do ar para as 4 soluções de isolamento térmico da fachada opaca. A análise dos resultados evidencia um aumento do desconforto térmico de verão com o acréscimo da espessura de isolamento da fachada opaca:

- A temperatura-limite de conforto de 27 °C (Categoria III) é ultrapassada numa percentagem mais elevada de horas da estação de arrefecimento, nas soluções com maior espessura de

isolamento da fachada (4 cm, 8 cm e 12 cm de XPS, com U igual 0.54, 0.34 e 0.25 W/m².°C, respetivamente). O acréscimo da percentagem de horas de desconforto é particularmente evidente no sul de Portugal, com destaque para Lisboa (6.5 %) e Faro (4.9 %);

- Na Categoria II (26 °C), tal como na Categoria III, regista-se o crescimento da percentagem de horas de desconforto, com o aumento da espessura do isolamento da fachada, nas 4 localizações. O maior acréscimo é registado em Lisboa (5.4 %) e em Faro (2.7 %).

Quadro 6.3 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento – 4 soluções de U

Local	Estação Arrefecimento (M/h)	Solução	F _{acum} (T=26°C)	F _{acum} (T=27°C)
Porto	4.0 m /2928 h	S/ Isol.	97.7%	100.0%
		4 cm XPS	98.7%	100.0%
		8 cm XPS	98.6%	100.0%
		12 cm XPS	98.5%	100.0%
Lisboa	4.0 m /2928 h	S/ Isol.	29.6%	50.4%
		4 cm XPS	25.8%	45.9%
		8 cm XPS	24.7%	44.3%
		12 cm XPS	24.2%	43.9%
Bragança	4.0 m /2928 h	S/ Isol.	63.2%	73.2%
		4 cm XPS	62.1%	73.2%
		8 cm XPS	61.6%	73.4%
		12 cm XPS	61.3%	73.4%
Faro	4.0 m /2928 h	S/ Isol.	7.7%	32.0%
		4 cm XPS	5.3%	28.9%
		8 cm XPS	5.2%	27.5%
		12 cm XPS	5.0%	27.1%

6.2.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO

O estudo comparativo da eficiência energética de inverno do Apartamento-Tipo, para as 4 localizações geográficas do território nacional, das 4 soluções de isolamento térmico da fachada opaca (sem isolamento, 4 cm XPS, 8 cm XPS, 12 cm XPS), é traduzido no Quadro 6.4. Os resultados representam o valor da energia de aquecimento, ao longo da estação de aquecimento, para as Categorias III (18 °C) e II (20 °C) da EN 15251.

Quadro 6.4 - Energia de aquecimento (Categorias III e II) – 4 soluções de U

Localização	Solução	Cat. III – 18°C (kWh/m ²)	Cat. II – 20°C (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	4.17	17.76
	4 cm XPS	2.03	11.14
	8 cm XPS	1.44	9.51
	12 cm XPS	1.16	8.76
Lisboa	S/ Isol.	0.68	6.78
	4 cm XPS	0.06	3.10
	8 cm XPS	0.01	2.35
	12 cm XPS	0.01	2.04
Bragança	S/ Isol.	37.46	64.06
	4 cm XPS	28.53	50.81
	8 cm XPS	26.11	47.24
	12 cm XPS	24.96	45.55
Faro	S/ Isol.	0.00	0.49
	4 cm XPS	0.00	0.00
	8 cm XPS	0.00	0.00
	12 cm XPS	0.00	0.00

Da análise dos resultados do Quadro 6.4 conclui-se que, na Categoria III (18 °C), a variação do valor da energia de aquecimento, com o aumento da espessura do isolamento da fachada opaca, é nula em Faro e é quase nula em Lisboa (a energia de aquecimento é quase nula a partir de uma espessura de isolamento de 8 cm de XPS). No Porto, o valor da energia de aquecimento é já de si, pouco expressivo para a solução sem isolamento térmico na fachada (4.17 kWh/m²). Para a solução com 12 cm XPS, reduz-se para 1.16 kWh/m². Em Bragança, a redução da solução sem isolamento térmico, para a solução com 12 cm XPS, faz-se de 37.46 kWh/m² para 24.96 kWh/m² (2/3 do valor inicial).

Na Categoria II (20 °C), o valor da energia de aquecimento é praticamente nulo em Faro para as 4 soluções. Em Lisboa, o valor referente à solução sem isolamento térmico na fachada é baixo (6.78 kWh/m²), reduzindo-se a menos de metade nas soluções com 4 cm, 8 cm e 12 cm de XPS. No Porto, o valor da energia de aquecimento para a solução com o 12 cm de XPS é metade do valor referente à solução sem isolamento térmico na fachada e em Bragança esse valor é de 70 %.

6.2.5. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO

O estudo da eficiência energética de verão das 4 soluções de isolamento térmico da fachada opaca (sem isolamento, 4 cm XPS, 8 cm XPS e 12 cm XPS) é obtido pelo cálculo do valor da energia de arrefecimento, do Apartamento-Tipo, nas 4 localizações geográficas, para as Categorias III e II da EN 15251 (27 °C e 26 °C, respetivamente), de acordo com o representado no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 - Energia de arrefecimento (Categorias III e II) – 4 soluções de U

Localização	Solução	Cat. III – 27°C (kWh/m ²)	Cat. II – 26°C (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	0.00	0.10
	4 cm XPS	0.00	0.05
	8 cm XPS	0.00	0.05
	12 cm XPS	0.00	0.05
Lisboa	S/ Isol.	5.19	10.62
	4 cm XPS	5.40	10.66
	8 cm XPS	5.46	10.68
	12 cm XPS	5.50	10.70
Bragança	S/ Isol.	3.35	6.51
	4 cm XPS	2.95	5.86
	8 cm XPS	2.87	5.71
	12 cm XPS	2.83	5.65
Faro	S/ Isol.	11.09	18.15
	4 cm XPS	10.40	16.94
	8 cm XPS	10.28	16.68
	12 cm XPS	10.23	16.56

Os resultados apresentados no Quadro 6.5 permitem concluir que a variação do valor da energia de arrefecimento, com o aumento da espessura do isolamento térmico da fachada opaca, é praticamente nula. No Porto, o valor da energia de arrefecimento é quase nulo para ambas as categorias. Em Lisboa é inferior a 6 kWh/m² para a Categoria III, e inferior a 11 kWh/m² para a Categoria II. Em Bragança, o valor é próximo de 3.0 kWh/m², para a Categoria III, e próximo de 6 kWh/m² para a Categoria II. Em Faro é inferior a 12 kWh/m² para a Categoria III, e próximo de 18 kWh/m² para a Categoria II.

6.2.6. CONCLUSÕES

Foi avaliada a influência do coeficiente de transmissão térmica, U , da fachada opaca do edifício, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo, no verão e no inverno, em 4 localizações geográficas do território nacional. O estudo foi desenvolvido para 4 soluções distintas de isolamento térmico da fachada (sem isolamento, 4 cm, 8 cm e 12 cm de isolamento aplicado), que se traduzem nos seguintes valores de U da fachada opaca do edifício: 1.30, 0.54, 0.34 e 0.25 W/m².°C, respetivamente.

A análise comparativa de resultados foi estabelecida com recurso ao modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007), ao cálculo dos valores da temperatura mínima, no inverno, em regime livre, e dos valores das frequências acumuladas de temperatura, no verão. Foi estimado o valor da energia de aquecimento e de arrefecimento necessária à obtenção do conforto térmico, no inverno e no verão, respetivamente. Complementarmente apresenta-se nos Anexos V e VI da Tese, o estudo dos percentis de temperatura do ar interior, no inverno e no verão, e do valor mensal da energia de aquecimento e de arrefecimento.

O estudo realizado permite extrair as seguintes conclusões:

- No inverno, na Categoria III da EN 15251, a redução do valor da percentagem de desconforto térmico entre a solução sem isolamento térmico na fachada opaca, e a solução com 12 cm XPS, atinge um valor máximo de 11.2 % em Bragança. Para as restantes localizações a redução da percentagem de desconforto é sempre inferior a 10 %. Na Categoria II, a redução do valor da percentagem de desconforto é mais elevada em Lisboa (29.4 %) e no Porto (21 %), do que em Bragança (8.6 %) e Faro (7.7 %);
- No verão, na Categoria III da EN 15251, a percentagem de desconforto térmico é nula para as 4 soluções de isolamento térmico da fachada opaca, nas 4 localizações do território nacional. Na Categoria II, a percentagem de desconforto térmico é nula para o Porto e Bragança. Em Faro e em Lisboa há um aumento da percentagem de desconforto térmico de 0.3 % e 4.4 %, respetivamente, com o aumento da espessura do isolamento da fachada opaca para 12 cm XPS;
- O estudo das frequências acumuladas de temperatura, no verão, permite observar um aumento da percentagem de horas de desconforto da estação de arrefecimento, com o aumento da espessura do isolamento térmico da fachada opaca. O acréscimo da percentagem de horas de desconforto é mais significativo em Lisboa (6.5 % para $T_i = 27^\circ\text{C}$ e 5.4 % para $T_i = 26^\circ\text{C}$), e em Faro (4.9 % para $T_i = 27^\circ\text{C}$ e 2.7 % para $T_i = 26^\circ\text{C}$);
- O estudo dos valores da temperatura mínima do ar interior, T_{min} , no inverno, em regime livre, para as 4 soluções de isolamento térmico da fachada, nos 4 locais ensaiados, evidencia um acréscimo do seu valor em cerca de 1.3 °C, da solução sem isolamento térmico na fachada, para a solução com 12 cm XPS. Para espessuras menores (4cm e 8cm XPS), o acréscimo do valor de T_{min} , no inverno, não excede 0.3 °C. O valor de T_{min} excede o limite de conforto de 18 °C (Categoria III) apenas em Faro;
- No inverno, a redução do valor da energia de aquecimento, com o aumento da espessura do isolamento da fachada opaca, nas Categorias III (18 °C) e II (20 °C), atinge valores pouco significativos em Faro (0.00 e 0.49 kWh/m², respetivamente) e em Lisboa (0.67 e 4.74 kWh/m², respetivamente). No Porto, a redução do valor da energia de aquecimento é baixa na Categoria III (3.0 kWh/m²) e mais elevado na Categoria II (9.0 kWh/m²). Em Bragança o valor é elevado para ambas as categorias (12.5 e 18.5 kWh/m², respetivamente);
- No verão, a variação do valor da energia de arrefecimento, para as Categorias III (27 °C) e II (26 °C), com o aumento da espessura do isolamento térmico da fachada opaca, é praticamente nula.
- Em face do exposto conclui-se que a redução do valor do coeficiente de transmissão térmica, U , da fachada opaca do edifício, traduz-se no seguinte:
 - Numa redução pouco significativa da percentagem de desconforto térmico, nos 4 locais, na Categoria III (18 °C);
 - Na Categoria II (20 °C), a redução da percentagem de desconforto é mais acentuada em Lisboa e no Porto. Em Faro, para fachadas não isoladas, o desconforto térmico de inverno é muito reduzido, enquanto em Bragança, o aumento da espessura do isolamento da fachada opaca, sem recurso à utilização de aquecimento do ar ambiente, não produz uma redução significativa da percentagem de desconforto térmico;

- **A variação do consumo de energia de aquecimento para a obtenção do conforto térmico apresenta valores reduzidos em Faro e Lisboa, para as Categorias II e III.** No Porto, a variação é reduzida na Categoria III (18 °C) (cerca de 3.0 kWh/m²) e mais elevada na Categoria II (20 °C) (cerca de 9.0 kWh/m²). Em Bragança, a redução do valor da energia de aquecimento com o aumento da espessura do isolamento atinge um valor superior a 12.5 kWh/m², na Categoria III, e superior a 18.5 kWh/m², na Categoria II;
- **A variação do consumo de energia de arrefecimento para a obtenção do conforto térmico é praticamente nula com o aumento da espessura do isolamento da fachada opaca.**
- **As respostas às questões formuladas no Capítulo 6.2.1, na sequência do estudo desenvolvido, são agora simples de dar:**
 - **Nos edifícios de habitação social, em livre flutuação de temperatura, não há uma redução substancial do desconforto térmico, nem um aumento da eficiência energética dos apartamentos, com a redução do U da fachada opaca com aplicação de isolamento pelo exterior. A redução do desconforto térmico de inverno é menos evidente em Faro, em Lisboa e no Porto, e mais evidente em Bragança;**
 - **O aumento da espessura do isolamento térmico aplicado, não conduz a uma redução significativa do valor da energia de aquecimento no Porto, em Lisboa e em Faro. Em Bragança, o reforço do isolamento exterior da fachada conduz a uma redução do seu valor, de acordo com o evidenciado na Figura 6.4.**

Os gráficos da Figura 6.4 relacionam o valor da energia de aquecimento dos 4 cenários simulados (Categoria III), nas 4 localizações geográficas, com o valor do produto entre o coeficiente de perdas por unidade de volume, G (W/m³.°C) (de Freitas, 1985) e o número de graus-dias de aquecimento do local, GD (°C.dias) (RCCTE, 2006). O coeficiente de perdas por unidade de volume, G (W/m³.°C), é igual ao somatório das perdas térmicas para uma diferença unitária de temperatura entre o exterior e o interior, divididas pelo seu volume habitável (de Freitas, 1985).

A observação da Figura 6.4 permite constatar que no Porto e em Lisboa há uma diminuição acentuada no declive da curva de correlação, com a redução do valor do coeficiente de perdas volumétricas. A redução do declive da curva significa que o aumento da espessura do isolamento da fachada opaca não se traduz numa redução acentuada do valor da energia de aquecimento. Em Bragança, essa redução é mais acentuada, o que indicia uma maior influência do U da fachada opaca, na diminuição do valor da energia de aquecimento necessária ao conforto. Em Faro o valor do coeficiente de perdas volumétricas é nulo nas 4 soluções de isolamento térmico da fachada, o que diminui o papel do U da fachada no desempenho térmico de inverno.

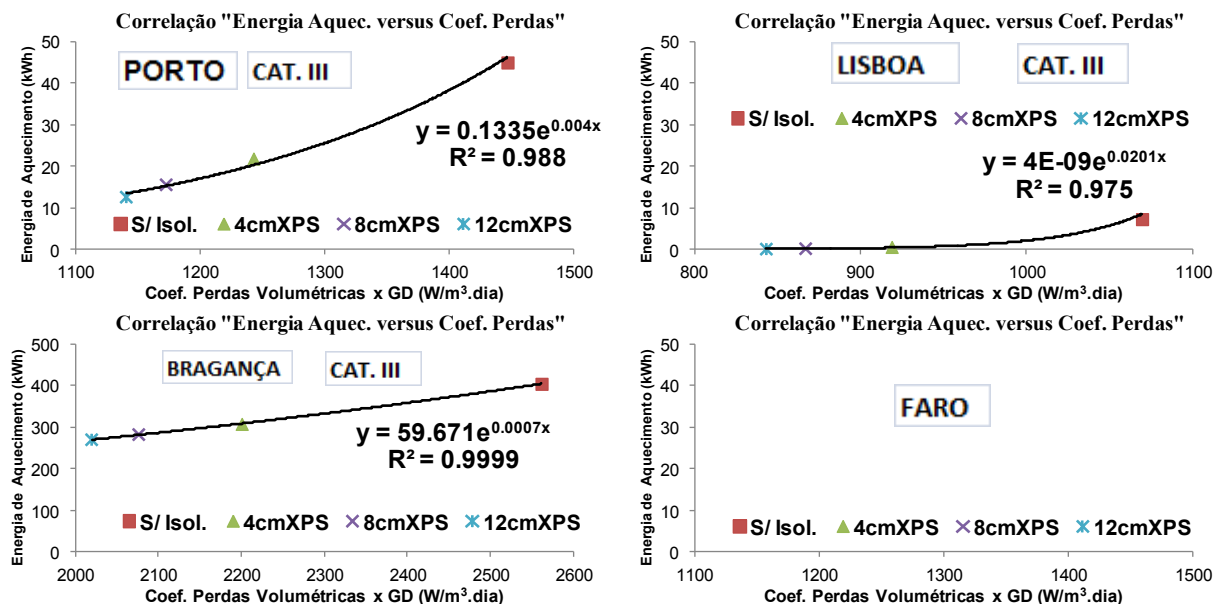


Figura 6.4 – Correlação entre a energia de aquecimento e o coeficiente de perdas por unidade de volume

6.3. INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO PELO INTERIOR DA FACHADA

6.3.1. OBJETIVOS

A avaliação da influência do isolamento térmico pelo interior da fachada opaca, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo, foi estabelecida, de forma comparativa, entre a solução referente ao edifício reabilitado, sem aplicação de isolamento térmico na fachada opaca ($U = 1.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e a solução correspondente à aplicação pelo interior da fachada opaca de 4cm de XPS de ($U = 0.54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). O estudo foi desenvolvido nos períodos de inverno e de verão.

Assumindo que num cenário de reabilitação das fachadas com aplicação de isolamento térmico pelo interior, se bloqueia a possibilidade de interação entre a massa de armazenamento térmico dos elementos construtivos e o espaço interior, as questões que neste contexto se colocam são as seguintes:

- Sempre que numa ação de reabilitação da fachada de um edifício de habitação social não for possível, por questões arquitetónicas, isolar pela face exterior dos paramentos, será que se deve isolar pela sua face interior?
- Ou ao invés não se deve isolar de todo, tirando partido, em construções com elevada massa de armazenamento térmico, do efeito da inércia térmica?

6.3.2. CONFORTO TÉRMICO DE INVERNO

Os gráficos da Figura 6.5 representam o estudo do conforto térmico do Apartamento-Tipo na estação de aquecimento, nos 4 locais representativos do território nacional, à luz da EN 15251, para duas soluções distintas: a solução referente ao edifício reabilitado, sem isolamento térmico na fachada opaca ($U = 1.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), e a solução correspondente à aplicação de 4 cm de XPS pelo seu interior ($U = 0.54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Nos 4 locais em estudo, os pontos representativos da solução com 4 cm de XPS, pelo interior da fachada opaca, estão localizados acima dos referentes à solução sem isolamento térmico, o que se traduz numa percentagem de desconforto térmico de inverno da solução com isolamento pelo interior, inferior à da solução sem isolamento.

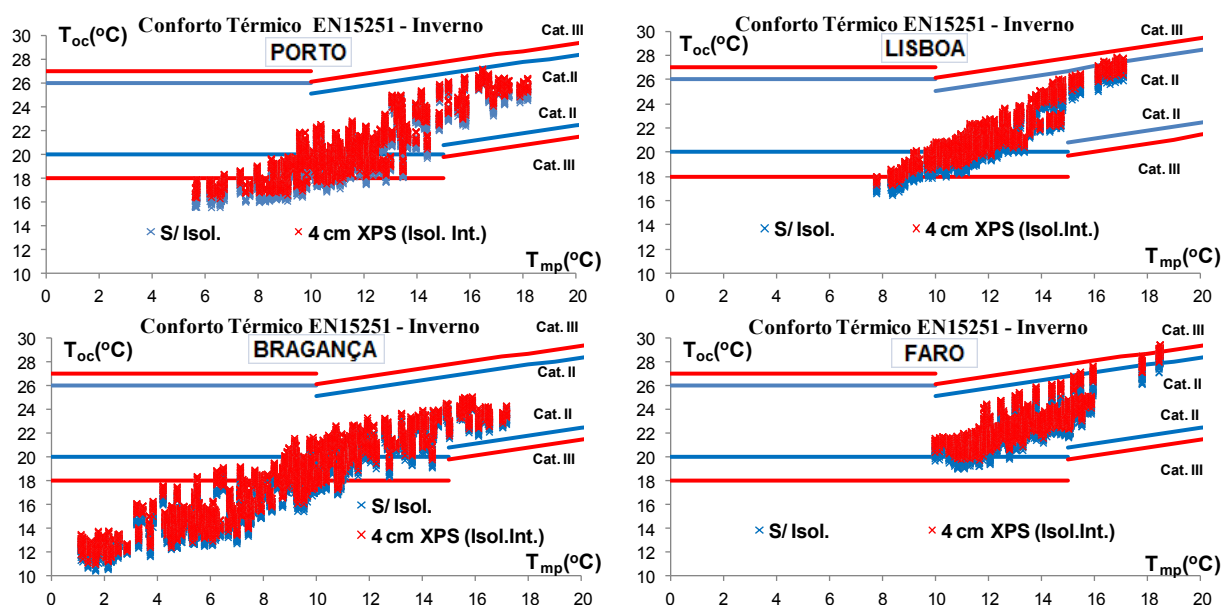


Figura 6.5 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento – Isolamento pelo interior

No Quadro 6.6 apresenta-se comparativamente o número de horas de desconforto térmico e as percentagens de desconforto na estação de aquecimento, entre as soluções sem isolamento térmico na fachada ($U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) e com 4cm XPS pelo seu interior ($U = 0.54 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$), no Porto, em Lisboa, em Faro e em Bragança.

A variação da percentagem de desconforto térmico, na Categoria III é inferior a 10 % em todos os locais estudados (é nula em Faro, de 3.4 % em Lisboa, de 5.3 % no Porto e de 7.4 % em Bragança). Na Categoria II, a variação da percentagem de desconforto atinge valores mais elevados (5.5 % em Bragança, 7.3 % em Faro, 13.0 % no Porto e de 20.5 % em Lisboa).

Da análise dos resultados do Quadro 6.6 conclui-se que a aplicação de isolamento térmico pelo interior da fachada, na Categoria III, se traduz numa redução pouco significativa do número de horas desconforto na estação de aquecimento, nos 4 locais. Na Categoria II, a redução do desconforto térmico de inverno é significativa em Lisboa e no Porto (superior a 10 %), apresentando valores inferiores a 10 % em Bragança e Faro.

Quadro 6.6 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de aquecimento – Isolamento pelo interior

Local	Estação Aquec. (M/h)	Solução	Desconforto (h) Cat. III	Desconforto (h)	% Cat. III	% Cat. II
Porto	6.7 m / 4848h	S/ Isol.	912	2876	18.8%	59.3%
		4 cm XPS (Isol Int)	655	2244	13.5%	46.3%
Lisboa	5.3 m / 3888h	S/ Isol.	183	1704	4.7%	43.8%
		4 cm XPS (Isol Int)	52	907	1.3%	23.3%
Bragança	8.0 m / 5832h	S/ Isol.	3207	4272	55.0%	73.3%
		4 cm XPS (Isol Int)	2775	3956	47.6%	67.8%
Faro	4.3 m / 3120h	S/ Isol.	0	239	0.0%	7.7%
		4 cm XPS (Isol Int)	0	12	0.0%	0.4%

Os percentis de temperatura, T_{10} e T_{50} são indicadores de desempenho térmico de inverno. O Quadro 6.7 representa os valores da temperatura do ar interior correspondentes aos percentis de frequência acumulada 10 e 50, na estação de aquecimento, nos 4 locais estudados, para as duas soluções em

análise: a solução sem isolamento térmico na fachada ($U = 1.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e a solução com 4 cm XPS pelo seu interior ($U = 0.54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). A diferença entre o valor da mediana, T_{50} e do percentil 10, T_{10} , nas duas soluções, é inferior a 1°C em todos os locais. O percentil 10, T_{10} , atinge valores acima do limite de conforto térmico, na Categoria III (18°C), em Faro e Lisboa, próximo do limite de conforto térmico, no Porto, e afastado desse valor em Bragança.

Quadro 6.7 - Percentis de temperatura na estação de aquecimento – Isolamento pelo interior

Local	Estação Aquecimento (M/h)	Solução	T_{10} ($^\circ\text{C}$)	T_{50} ($^\circ\text{C}$)
Porto	6.7 m / 4848h	S/ Isol.	17.0	19.5
		4 cm XPS (Isol Int)	17.7	20.2
Lisboa	5.3 m / 3888h	S/ Isol.	18.6	20.2
		4 cm XPS (Isol Int)	19.3	20.9
Bragança	8.0 m / 5832h	S/ Isol.	13.0	17.6
		4 cm XPS (Isol Int)	13.6	18.2
Faro	4.3 m / 3120h	S/ Isol.	20.1	22.0
		4 cm XPS (Isol Int)	20.9	22.6

6.3.3. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO

Os gráficos da Figura 6.6 representam o estudo comparativo do conforto térmico do Apartamento-Tipo, na estação de arrefecimento, nos 4 locais, à luz da EN 15251, entre as soluções sem isolamento térmico na fachada ($U = 1.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e com 4 cm de XPS pelo seu interior ($U = 0.54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

No verão é evidente, um menor desempenho térmico da solução com isolamento pelo interior relativamente à solução sem isolamento térmico na fachada. Em Faro, Lisboa e Bragança, observa-se uma percentagem elevada de pontos relativos à solução com isolamento pelo interior, acima das retas-limite de conforto referente à Categoria II. No Porto, os pontos representativos de ambas as soluções estão abaixo das retas que traduzem os limites de conforto de verão para as Categorias II e III.

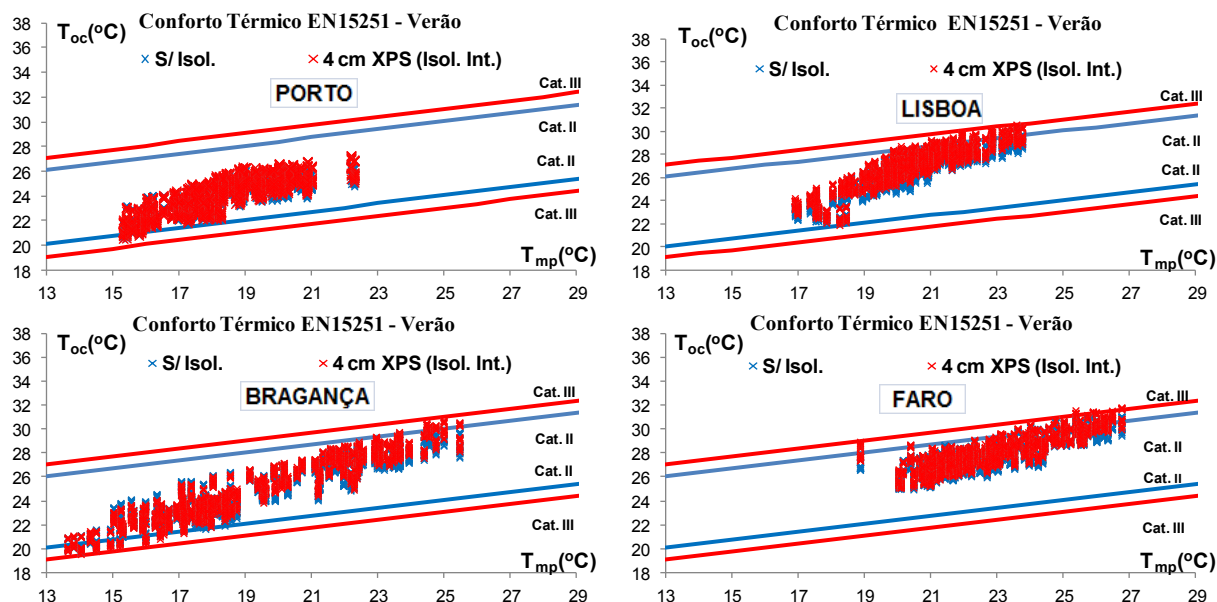


Figura 6.6 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – Isolamento pelo interior

No Quadro 6.8 representa-se o número de horas de desconforto térmico e as percentagens de desconforto na estação de arrefecimento, das duas soluções em análise.

A percentagem de desconforto térmico de verão das duas soluções, na Categoria III, é nula para todas as localizações. Na Categoria II, o acréscimo de desconforto térmico da solução com isolamento pelo interior relativamente à solução sem isolamento térmico na fachada é particularmente evidente em Lisboa (8.6 %) e em Faro (5.4 %). No Porto, o acréscimo de desconforto térmico é nulo e em Bragança de apenas 1.6 %.

O desconforto térmico de verão é condicionado pela localização do isolamento térmico na composição da fachada. A aplicação de isolamento pelo seu interior conduz a uma percentagem de desconforto térmico mais elevada do que a solução sem isolamento.

Quadro 6.8 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – Isolamento pelo interior

Local	Estação Arref. (M/h)	Solução	Desconforto (h) Cat. III	Desconforto (h) Cat. II	% Cat. III	% Cat. II
Porto	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	0	0	0.0%	0.0%
		4cm XPS (Isol Int)	0	0	0.0%	0.0%
Lisboa	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	0	46	0.0%	1.6%
		4cm XPS (Isol Int)	1	300	0.0%	10.2%
Bragança	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	0	0	0.0%	0.0%
		4cm XPS (Isol Int)	0	47	0.0%	1.6%
Faro	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	0	139	0.0%	4.7%
		4cm XPS (Isol Int)	25	295	0.9%	10.1%

O estudo das frequências acumuladas da temperatura do ar interior, no verão, permite comparar o desempenho térmico entre as soluções sem isolamento na fachada ($U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) e com 4 cm XPS aplicado pelo seu interior ($U = 0.54 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$). No Quadro 6.9 apresenta-se a percentagem de horas da estação de arrefecimento em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor do limite de conforto especificado nas Categorias II e III (26 °C e 27 °C, respetivamente).

A temperatura-limite de conforto de 27 °C (Categoria III) é ultrapassada numa percentagem mais elevada de horas da estação de arrefecimento na solução com isolamento térmico pelo interior. O acréscimo da percentagem de horas de desconforto é particularmente evidente em Lisboa (9.8 %) e Faro (6.9 %).

Na Categoria II (26 °C) é mantida a tendência de crescimento da percentagem de horas de desconforto térmico nas 4 localizações. O maior acréscimo da percentagem de horas de desconforto de verão é registado em Lisboa (8.1 %).

O estudo de frequências acumuladas de temperatura torna evidente o aumento do desconforto térmico de verão com a aplicação de isolamento térmico pelo interior da fachada opaca.

Quadro 6.9 - Frequências acumuladas de temperatura na estação de arrefecimento – Isolamento pelo interior

Local	Estação Arrefecimento. (M/h)	Solução	F_{acum} (T=26°C)	F_{acum} (T=27°C)
Porto	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	97.7%	100.0%
		4cm XPS (Isol. Int.)	92.3%	99.8%
Lisboa	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	29.6%	50.4%
		4cm XPS (Isol. Int.)	21.5%	40.6%
Bragança	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	63.2%	73.2%
		4cm XPS (Isol. Int.)	61.2%	68.6%
Faro	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	7.7%	32.0%
		4cm XPS (Isol. Int.)	5.6%	25.1%

O valor da temperatura máxima do ar interior, no verão, constitui um indicador de desempenho térmico das soluções em análise, avaliando o risco de sobreaquecimento. O gráfico da Figura 6.7 representa o valor mensal da temperatura máxima do ar interior em 3 meses da estação de arrefecimento (julho, agosto e setembro), nos 4 locais estudados, das soluções sem isolamento térmico na fachada, e com 4 cm de XPS aplicado pelo seu interior.

O seu valor é superior para a solução com isolamento térmico pelo interior, com diferenças que atingem 0.66 °C no Porto, 0.67 °C em Lisboa, 0.79 °C em Bragança e 0.73 °C em Faro. Nesta solução, a temperatura máxima do ar interior, T_{max} , atinge valores superiores a 30 °C, em Lisboa, Bragança e Faro, enquanto na solução sem isolamento térmico da fachada, esse valor é apenas excedido em Faro.

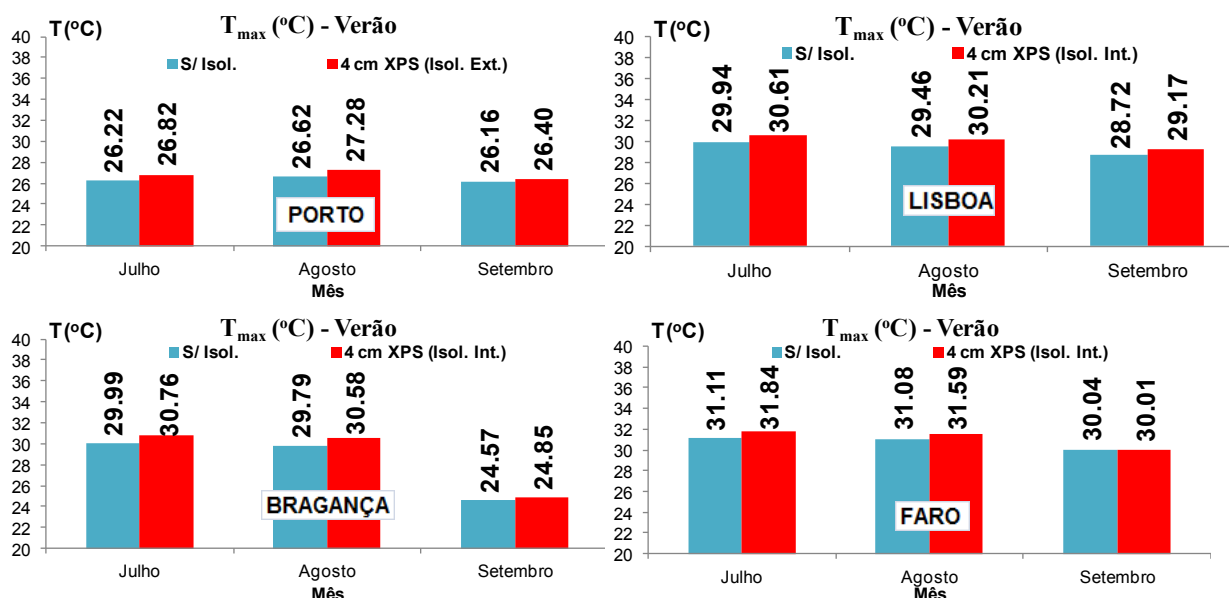


Figura 6.7 – Temperatura máxima mensal na estação de arrefecimento – Isolamento pelo interior

6.3.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERNO

Os resultados apresentados no Quadro 6.10 permitem estabelecer uma análise comparativa entre os valores da energia de aquecimento, no inverno, nas Categorias III (18 °C) e II (20 °C) da EN 15251, das soluções sem isolamento na fachada opaca ($U = 1.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e com 4 cm XPS aplicado pelo seu interior ($U = 0.54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), em 4 locais do território nacional.

Quadro 6.10 - Energia de aquecimento (Categorias III e II) – Isolamento pelo interior

Localização	Solução	Cat. III – 18°C (kWh/m ²)	Cat. II – 20°C (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	4.17	17.76
	4cm XPS (Isol. Int.)	2.05	11.35
Lisboa	S/ Isol.	0.68	6.78
	4cm XPS (Isol. Int.)	0.11	3.23
Bragança	S/ Isol.	37.46	64.06
	4cm XPS (Isol. Int.)	28.63	51.04
Faro	S/ Isol.	0.00	0.49
	4cm XPS (Isol. Int.)	0.00	0.01

O valor da energia de aquecimento, na Categoria III (18 °C), das soluções sem isolamento na fachada ($U = 1.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e com 4 cm XPS pelo seu interior ($U = 0.54 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) é inferior a 5 kWh/m^2 , no Porto, Lisboa e Faro. A diferença entre ambas as soluções, nos 3 locais, não é significativa (2.12 kWh/m^2 no Porto, 0.57 kWh/m^2 em Lisboa e 0 kWh/m^2 em Faro). Em Bragança, o valor da energia de aquecimento é mais elevado para ambas as soluções (superior a 25 kWh/m^2), pelo que a redução do seu valor assume um valor mais significativo (8.83 kWh/m^2).

Na Categoria II (20 °C), a redução do valor da energia de aquecimento é pouco significativa em Lisboa e Faro (3.55 kWh/m^2 e 0.48 kWh/m^2 , respetivamente). No Porto e em Bragança, a redução é mais significativa (6.41 kWh/m^2 e 13.02 kWh/m^2 , respetivamente).

6.3.5. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO

No Quadro 6.11 apresentam-se os valores da energia de arrefecimento, no verão, para os 4 locais, das soluções sem isolamento na fachada opaca ($U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) e com 4 cm XPS aplicado pelo seu interior ($U = 0.54 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$). Os resultados referem-se às Categorias III e II da EN 15251.

Quadro 6.11 - Energia de arrefecimento (Categorias III e II) – Isolamento pelo interior

Localização	Solução	Cat. III – 27°C (kWh/m^2)	Cat. II – 26°C (kWh/m^2)
Porto	S/ Isol.	0.00	0.10
	4cm XPS (Isol. Int.)	0.01	0.50
Lisboa	S/ Isol.	5.19	10.62
	4cm XPS (Isol. Int.)	6.43	11.96
Bragança	S/ Isol.	3.35	6.51
	4cm XPS (Isol. Int.)	4.10	7.09
Faro	S/ Isol.	11.09	18.15
	4cm XPS (Isol. Int.)	11.48	18.07

O valor da energia de arrefecimento, nas Categorias III e II, é superior, em todas as localizações, na solução com isolamento térmico pelo interior da fachada, do que na solução sem isolamento térmico. A diferença entre o valor da energia de arrefecimento de ambas as situações é reduzida, não ultrapassando 1.24 kWh/m^2 , na Categoria III, e 1.34 kWh/m^2 na Categoria II.

6.3.6. CONCLUSÕES

Foi avaliada a influência do isolamento térmico pelo interior da fachada opaca do edifício, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo, no verão e no inverno, em 4 localizações geográficas do território nacional, recorrendo para o efeito à comparação entre duas soluções de isolamento da fachada: a solução correspondente ao edifício reabilitado, sem isolamento térmico na fachada opaca ($U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) e a solução correspondente à aplicação pelo seu interior de 4 cm de XPS ($U = 0.54 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$).

A análise comparativa de resultados foi estabelecida com recurso ao modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007), ao cálculo dos valores dos percentis de temperatura, no inverno, das frequências acumuladas e da temperatura máxima, no verão. Foi estimado o valor da energia de aquecimento e de arrefecimento necessária à obtenção do conforto térmico, no inverno e no verão, respetivamente. Complementarmente apresenta-se nos Anexos V e VI da Tese, o estudo dos percentis de temperatura do ar interior no verão, e do valor mensal da energia de aquecimento e de arrefecimento, nas Categorias II e III.

O estudo realizado permite extrair as seguintes conclusões:

- No inverno, a percentagem de desconforto térmico da solução sem isolamento térmico, excede a relativa à solução com isolamento pelo interior, num valor que não ultrapassa 7.4 %, na Categoria III, e 20.5 %, na Categoria II. No verão, o processo é inverso. A percentagem de desconforto térmico da solução com isolamento pelo interior excede a relativa à solução sem isolamento, num valor máximo de 8.6 %, na Categoria II (na Categoria III não há desconforto térmico). O isolamento pelo interior da fachada, em face de uma situação de não isolamento da mesma, tem um efeito contrário, no inverno e no verão. Por um lado reduz o desconforto térmico de inverno, por outro agrava o desconforto de verão;

- O percentil de temperatura do ar interior (T_{10}), no inverno, apresenta uma variação que não ultrapassa 0.8 °C em todas as localizações. Em Lisboa e em Faro, o valor de T_{10} é superior ao valor da temperatura de conforto de 18 °C (Categoria III), para ambas as soluções. No Porto e em Bragança, o valor de T_{10} é inferior a 18 °C, tanto para a solução sem isolamento térmico na fachada, como para a solução de isolamento pelo seu interior;
- As temperaturas-limite de conforto de 26 °C e de 27 °C são ultrapassadas numa percentagem mais elevada de horas da estação de arrefecimento, na solução com isolamento pelo interior da fachada opaca ($U = 0.54 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$). O acréscimo da percentagem de horas de desconforto não excede 9.8 % (27 °C) e 8.1 % (26 °C). A solução sem isolamento térmico na fachada opaca afigura-se mais favorável no verão;
- O estudo dos valores da temperatura máxima do ar interior, T_{max} , no verão, em regime livre, para as duas soluções de isolamento térmico da fachada, nos 4 locais ensaiados, evidencia um acréscimo do seu valor em cerca de 0.7 °C, da solução com isolamento térmico pelo interior da fachada, em relação à solução sem isolamento. A aplicação de isolamento térmico pelo interior da fachada opaca incrementa o risco de sobreaquecimento no verão, dado que nesta solução se atinge um valor da temperatura máxima do ar interior, T_{max} , superior a 30 °C, em Lisboa, Bragança e Faro, enquanto na solução sem isolamento térmico na fachada, o valor de 30 °C é apenas excedido em Faro;
- O valor da energia de aquecimento da solução sem isolamento na fachada é superior ao da solução com isolamento pelo seu interior. A variação entre as duas soluções é inferior a 5 kWh/m², em Lisboa e Faro, nas Categorias II (20 °C) e III (18 °C), e no Porto, na Categoria III (18 °C). Em Bragança, nas Categorias II (20 °C) e III (18 °C), e no Porto, na Categoria II (20 °C), a variação do valor da energia de aquecimento é superior a 5 kWh/m²;
- Em oposição ao inverno, o valor da energia de arrefecimento da solução sem isolamento na fachada é superior ao da solução com isolamento pelo seu interior. A variação entre as duas soluções é inferior a 2 kWh/m², nos 4 locais e nas Categorias II (26 °C) e III (27 °C);
- Em face do exposto conclui-se que a solução de isolamento pelo interior da fachada opaca traduz-se, comparativamente à solução sem isolamento, num incremento do conforto térmico de inverno, na Categoria II, e num aumento do desconforto térmico de verão nas Categorias II e III. Na Categoria III, no inverno, a redução do desconforto térmico é pouco significativa nos 4 locais estudados, atingindo um valor máximo de 8 % em Bragança;
- O isolamento pelo interior da fachada traduz-se, face à opção de não isolar, num benefício na redução do desconforto térmico de inverno, e num agravamento do desconforto térmico de verão. Trata-se um efeito antagónico, que obriga a ponderar de forma equilibrada o investimento que resulta em isolar o edifício pelo seu interior.
- As respostas às questões formuladas no Capítulo 6.3.1, na sequência do estudo desenvolvido, são agora simples de dar:
 - O isolamento térmico pelo interior da fachada opaca, em edifícios de habitação social, traduz-se numa redução do desconforto térmico de inverno e num aumento do desconforto térmico de verão, comparativamente à solução sem isolamento térmico, para as 4 localizações estudadas (Porto, Lisboa, Bragança e Faro). O investimento que resulta em isolar pelo interior deve ser ponderado;

- A aplicação de isolamento térmico pelo interior da fachada reduz a inércia térmica do apartamento. Esta redução traduz-se numa maior flutuação da temperatura do ar interior, com o aumento do risco de sobreaquecimento dos espaços devido ao efeito da radiação solar, no verão, e aos picos diurnos de temperatura do ar exterior. **Os picos de sobreaquecimento no verão são evidentes no aumento do valor dos parâmetros T_{max} e T_{90} , nos 4 locais estudados, da solução com isolamento pelo interior, face à solução sem isolamento térmico na fachada.**

6.4. INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO NOTURNA

6.4.1. OBJETIVOS

A avaliação da influência da ventilação noturna no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo, no verão, foi estabelecida, tendo como base de análise, a solução correspondente ao edifício reabilitado, com a introdução no período noturno, entre 0 e as 8 horas, de uma taxa de renovação de ar igual a 5 h^{-1} .

De acordo com o modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007), o Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional de Lordelo apresenta uma reduzida percentagem de desconforto térmico, na estação de arrefecimento, nas 4 localizações geográficas estudadas (Capítulo 5). Com a introdução do efeito da ventilação noturna pretende-se avaliar se, em face do bom desempenho térmico de verão do Apartamento-Tipo, há ainda uma possível margem de melhoria.

O objetivo do estudo é simular o efeito do aumento da taxa de renovação de ar em regime térmico de verão, durante o período noturno e avaliar a sua repercussão na variação da temperatura do ar interior do Apartamento-Tipo. As questões que neste contexto se colocam são as seguintes:

- Será que o incremento do valor da taxa de renovação horária no período noturno, em regime térmico de verão, se traduz num decréscimo da temperatura do ar interior e consequentemente no incremento do nível de conforto térmico experimentado pelos ocupantes?
- A partir de que valor a taxa de renovação de ar deixa de ser significativa na redução da energia de arrefecimento necessária à obtenção do conforto?

6.4.2. CONFORTO TÉRMICO DE VERÃO

Nos gráficos da Figura 6.8 apresenta-se o estudo do conforto térmico do Apartamento-Tipo na estação de arrefecimento, em 4 locais representativos do território nacional, à luz da EN 15251, para a solução referente ao edifício reabilitado, com e sem ventilação noturna.

Os pontos que representam os resultados de simulação numérica, referentes à solução com ventilação noturna, estão localizados abaixo dos referentes à solução sem ventilação noturna, nos 4 locais estudados. Os resultados da solução com ventilação noturna estão ainda abaixo das retas que definem o limite superior de conforto nas Categorias III e II, o que revela um melhor desempenho térmico de verão.

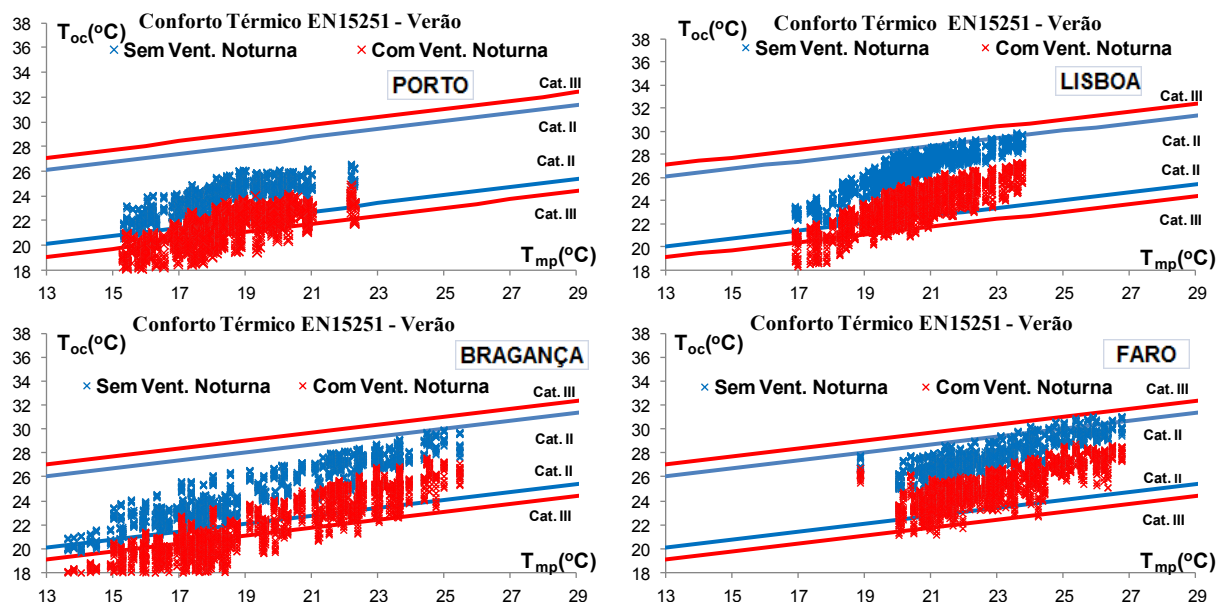


Figura 6.8 – Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – Ventilação noturna

No Quadro 6.12 representa-se o número de horas de desconforto térmico e as percentagens de desconforto na estação de arrefecimento, das duas soluções em análise. Os resultados referem-se às Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007).

A redução da percentagem de desconforto térmico de verão entre as soluções com e sem ventilação noturna, na Categoria III, é nula nos 4 locais, e na Categoria II, é nula no Porto e em Bragança, e de 1.6 % e 4.7 %, em Lisboa e Faro, respetivamente.

O desconforto térmico de verão é nulo, nas Categorias II e III, após a introdução do efeito da ventilação noturna. A redução do desconforto térmico de verão é particularmente evidente em Lisboa e Faro.

Quadro 6.12 - Conforto térmico à luz da EN 15251 na estação de arrefecimento – Ventilação noturna

Local	Estação Arrefecimento (M/h)	Solução	Desconforto (h)		%	
			Cat. III	Cat. II	Cat. III	Cat. II
Porto	4.0 m / 2928 h	S/ Vent. Not.	0	0	0.0%	0.0%
		C/ Vent. Not.	0	0	0.0%	0.0%
Lisboa	4.0 m / 2928 h	S/ Vent. Not.	0	46	0.0%	1.6%
		C/ Vent. Not.	0	0	0.0%	0.0%
Bragança	4.0 m / 2928 h	S/ Vent. Not.	0	0	0.0%	0.0%
		C/ Vent. Not.	0	0	0.0%	0.0%
Faro	4.0 m / 2928 h	S/ Vent. Not.	0	139	0.0%	4.7%
		C/ Vent. Not.	0	0	0.0%	0.0%

A Figura 6.9 representa as curvas de frequência acumulada da temperatura do ar interior na estação de arrefecimento, nos 4 locais simulados, das soluções com e sem ventilação noturna. A curva de frequências acumuladas relativa à solução sem ventilação noturna sofreu uma translação, nas 4 localizações geográficas, no sentido das temperaturas mais baixas.

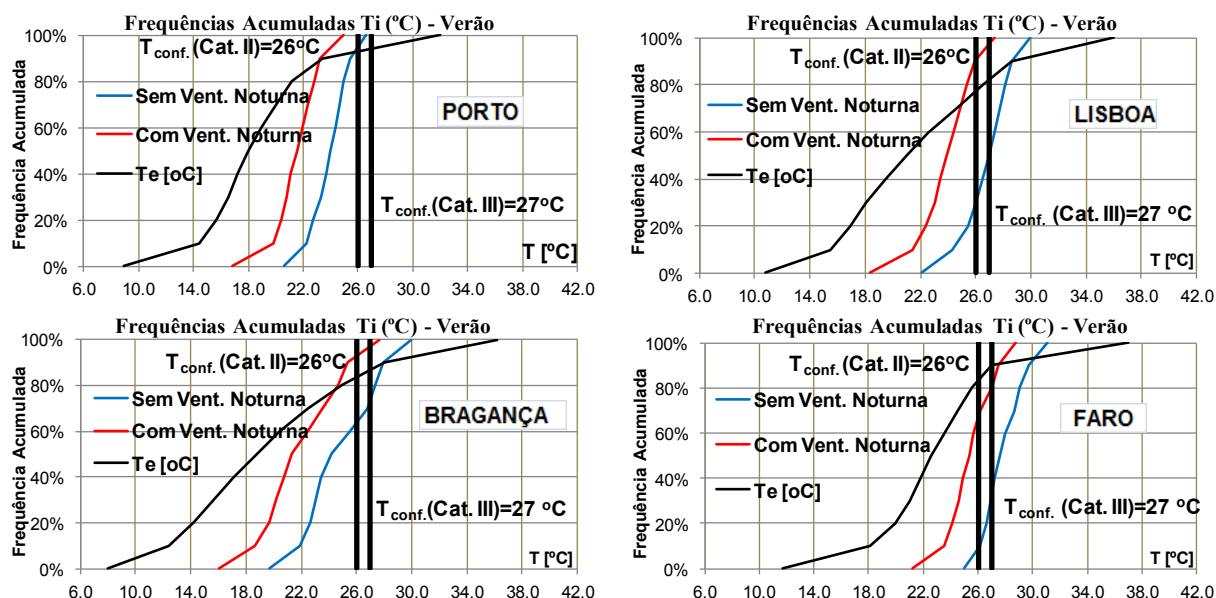


Figura 6.9 – Curvas de frequências acumuladas na estação de arrefecimento – Ventilação noturna

O Quadro 6.13 apresenta os valores da temperatura do ar interior correspondentes aos percentis de frequência acumulada 50 e 90, e a percentagem de horas da estação de arrefecimento em que a temperatura do ar interior é inferior ao valor do limite de conforto especificado nas Categorias II e III (26 °C e 27 °C, respetivamente).

Quadro 6.13 - Percentis e frequências acumuladas na estação de arrefecimento – Ventilação noturna

Local	Estação Arrefecimento (M/h)	Solução	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)	F_{acum} (T=26°C)	F_{acum} (T=27°C)
Porto	4.0 m / 2928 h	S/ Vent. Noturna	24.0	25.4	97.7%	100.0%
		C/ Vent. Noturna	21.6	23.2	100.0%	100.0%
Lisboa	4.0 m / 2928 h	S/ Vent. Noturna	27.0	28.6	29.6%	50.4%
		C/ Vent. Noturna	23.9	25.9	91.0%	98.7%
Bragança	4.0 m / 2928 h	S/ Vent. Noturna	24.2	28.0	63.2%	73.2%
		C/ Vent. Noturna	21.3	25.4	95.4%	98.4%
Faro	4.0 m / 2928 h	S/ Vent. Noturna	27.6	29.7	7.7%	32.0%
		C/ Vent. Noturna	25.3	27.5	66.2%	80.3%

A análise dos valores dos percentis de temperatura do ar interior, T_{50} e T_{90} , nos 4 locais, permite avaliar o efeito da ventilação noturna na melhoria do desempenho térmico de verão. O percentil de temperatura, T_{50} (mediana), na solução com ventilação noturna, sofre uma redução que varia entre 2.3 °C e 3.1 °C, atingindo valores inferiores a 25 °C, em todos os locais com exceção de Faro (25.3 °C). O valor do percentil de temperatura, T_{90} , tem uma redução de 2.2 °C, no Porto e em Faro, de 2.6 °C, em Bragança, e de 2.7 °C, em Lisboa.

Tal como o estudo dos percentis, a análise das frequências acumuladas de temperatura permite avaliar o efeito da ventilação noturna na melhoria do desempenho térmico de verão. A análise dos resultados apresentados no Quadro 6.13 permite concluir que o seu efeito é particularmente evidente em Lisboa e Faro, menos marcado em Bragança, e praticamente nulo no Porto:

-Na Categoria III (27 °C), a redução da percentagem de horas desconforto é de 48.3 %, em Faro e Lisboa, de 25.2 % em Bragança e nula no Porto;

- Na Categoria II (26 °C), a redução da percentagem das horas de desconforto é de 61.4 % em Lisboa, de 58.5 % em Faro, de 32.2 % em Bragança e de 2.3 % no Porto.

A análise do valor da temperatura máxima do ar interior permite avaliar o risco de sobreaquecimento em regime térmico de verão. O gráfico da Figura 6.10 representa o valor mensal da temperatura máxima do ar interior em 3 meses da estação de arrefecimento (julho, agosto e setembro), nos 4 locais simulados, das soluções com e sem ventilação noturna.

A introdução da ventilação noturna produz uma redução no valor da temperatura máxima do ar interior, T_{max} , de 1.71 °C, no Porto, e de 2.91 °C, em Lisboa. Em Bragança, a variação é de 2.68 °C, e em Faro de 2.44 °C. O valor de T_{max} é inferior a 29 °C nos 4 locais.

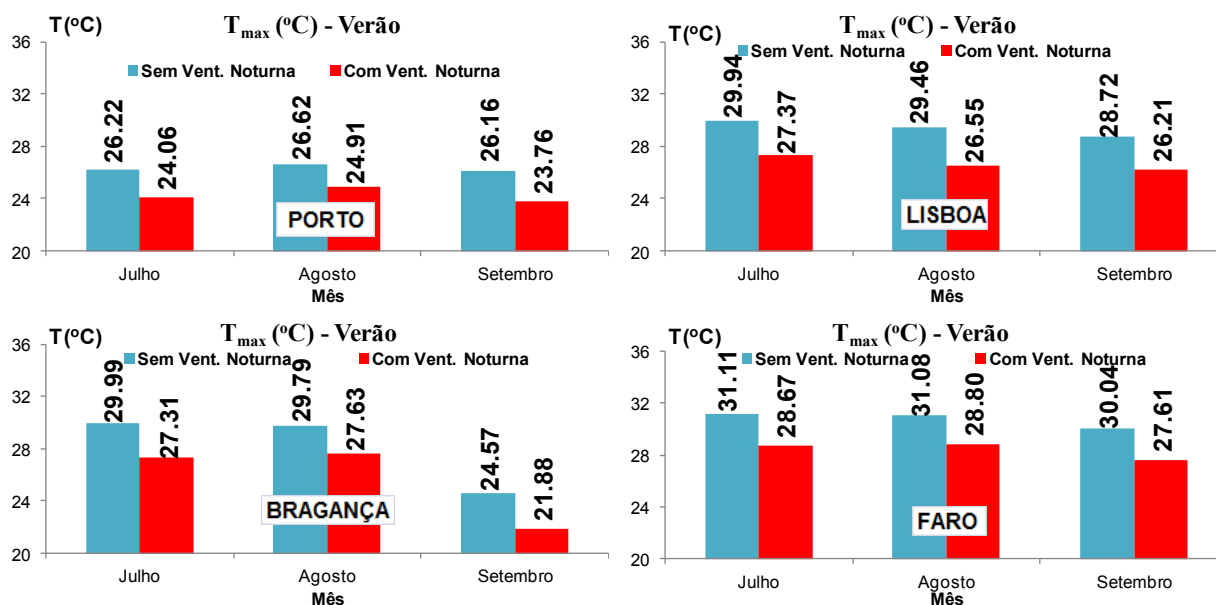


Figura 6.10 – Temperatura máxima mensal na estação de arrefecimento – Ventilação noturna

6.4.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VERÃO

Os resultados apresentados no Quadro 6.14 permitem estabelecer uma análise comparativa dos valores da energia de arrefecimento, no verão, para as 4 localizações geográficas do território nacional, das soluções com e sem ventilação noturna. Os resultados referem-se às Categorias II e III da EN 15251 (CEN, 2007).

Quadro 6.14 - Energia de arrefecimento (Categorias III e II) – Ventilação noturna

Localização	Solução	Cat. III – 27°C (kWh/m ²)	Cat. II – 26°C (kWh/m ²)
Porto	S/ Vent. Noturna	0.00	0.10
	C/ Vent. Noturna	0.00	0.00
Lisboa	S/ Vent. Noturna	5.19	10.62
	C/ Vent. Noturna	0.03	0.70
Bragança	S/ Vent. Noturna	3.35	6.51
	C/ Vent. Noturna	0.10	0.72
Faro	S/ Vent. Noturna	11.09	18.15
	C/ Vent. Noturna	1.91	5.47

A introdução da ventilação noturna possibilita uma redução da energia de arrefecimento, nos 4 locais, nas Categorias II e III, para valores inferiores a 6 kWh/m². No Porto, Lisboa e Bragança, o efeito da ventilação noturna conduz a um valor praticamente nulo da energia de arrefecimento, enquanto em Faro, o valor é reduzido de 11.09 kWh/m² para 1.91 kWh/m², na Categoria III, e de 18.15 kWh/m² para 5.47 kWh/m², na Categoria II.

6.4.4. CONCLUSÕES

Foi avaliada a influência da ventilação noturna no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo, no verão, em 4 localizações geográficas do território nacional, tendo com base de análise a solução correspondente ao edifício reabilitado.

O estudo comparativo foi estabelecido com recurso ao modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007), à análise das frequências acumuladas de temperatura, ao estudo dos percentis de temperatura do ar interior, e ao cálculo do valor da temperatura máxima no verão. Foi estimado o valor da energia de arrefecimento necessária à obtenção do conforto térmico. Complementarmente apresenta-se no Anexo VI da Tese, o estudo do valor mensal da energia de arrefecimento, nas Categorias II e III.

Os resultados assim obtidos permitem extrair as seguintes conclusões:

- **O desconforto térmico de verão é nulo, nas Categorias II e III, após a introdução do efeito da ventilação noturna.** A redução do desconforto térmico de verão é particularmente evidente em Lisboa e Faro;
- **O efeito da ventilação noturna permite uma redução dos valores dos percentis de temperatura do ar interior, T_{50} e T_{90} , superior a 2 °C**, atingindo-se valores próximos da temperatura de conforto de 25 °C (RCCTE, 2006; REH, 2013). O valor da temperatura máxima do ar interior, T_{max} , é inferior a 29 °C, nos 4 locais;
- **O estudo de frequências acumuladas de temperatura permite concluir que nas Categorias II (26 °C) e III (27 °C), a redução da percentagem de horas desconforto é próxima de 50 %, em Faro e Lisboa, de 25 %, em Bragança, e praticamente nula no Porto. O efeito benéfico da ventilação noturna é sobretudo sentido a sul de Portugal;**
- **A introdução da ventilação noturna permite a redução da energia de arrefecimento, nos 4 locais, nas Categorias II e III, para valores inferiores a 6 kWh/m²;**
- Em face do exposto conclui-se que o efeito da ventilação noturna em regime térmico de verão traduz-se, nas 4 localizações estudadas, num aumento do conforto térmico, com redução da percentagem de horas de desconforto na estação de arrefecimento, e num aumento da eficiência energética, com redução do valor da energia de arrefecimento. Contudo, esse efeito benéfico não apresenta dimensão idêntica nas 4 localizações. **A redução do desconforto térmico é sobretudo evidente em Lisboa e Faro, menos acentuada em Bragança, e quase inexistente no Porto.**
- **A resposta às questões formuladas no Capítulo 6.4.1, na sequência do estudo desenvolvido, é agora simples de dar:**
 - **O incremento do valor da taxa de renovação horária, no período noturno, traduz-se numa redução do desconforto térmico de verão, nas 4 localizações geográficas estudadas para o efeito. Esse efeito é mais acentuado no sul de Portugal (Lisboa e**

Faro), menos acentuado no interior norte (Bragança), e quase inexistente no litoral Norte (Porto);

- A partir de um valor da taxa de renovação de 4 h^{-1} , a redução do valor da energia de arrefecimento torna-se menos significativa.

Os gráficos da Figura 6.11 relacionam o valor da energia de arrefecimento (Categoria III) de um conjunto de cenários de ventilação noturna, com taxas de renovação distintas: 2 h^{-1} , 3 h^{-1} , 4 h^{-1} , 5 h^{-1} , 6 h^{-1} , nas 4 localizações geográficas.

A observação dos gráficos permite constatar que há uma diminuição acentuada no declive da curva de correlação, com o aumento do valor da taxa de renovação de ar. A redução do valor da energia de arrefecimento torna-se menos significativa a partir das 4 h^{-1} .

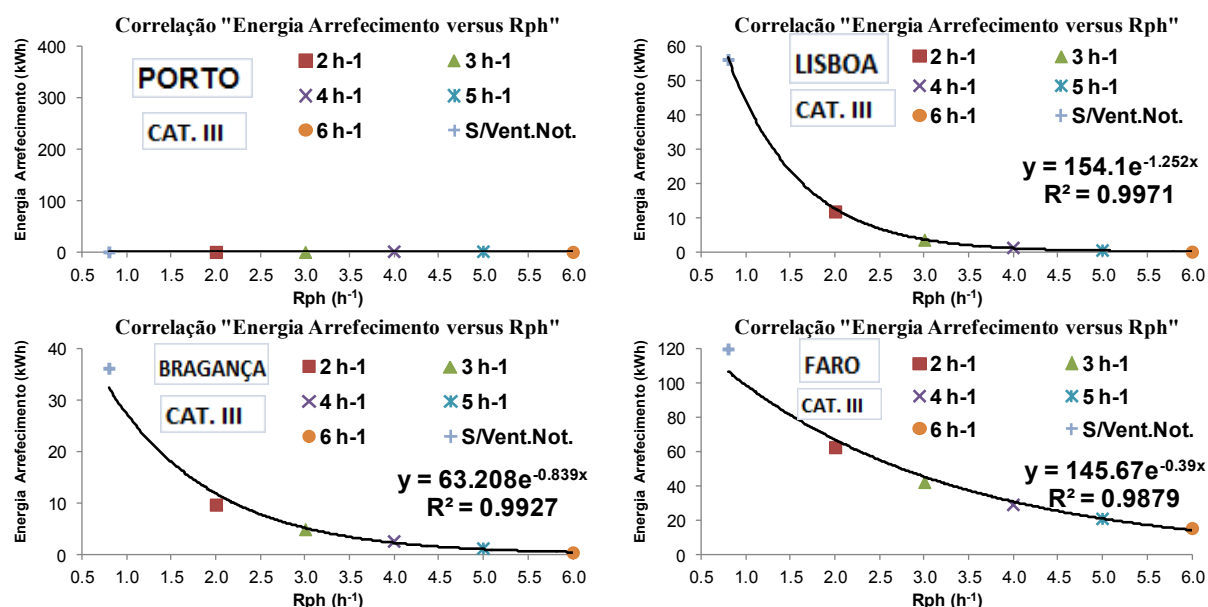


Figura 6.11 – Correlação entre a energia de arrefecimento e a taxa de renovação de ar para ventilação noturna

6.5. AVALIAÇÃO DO DESCONFORTO TÉRMICO – INDICADOR DE DESEMPENHO

6.5.1. ENQUADRAMENTO

Na sequência do estudo de avaliação do efeito do isolamento térmico das paredes de fachada e da ventilação noturna, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo tomado como exemplo, em 4 localizações geográficas representativas do território nacional, foi desenvolvido um indicador de desempenho que visa avaliar o desconforto térmico de inverno e de verão.

O indicador de desempenho designa-se por Indicador de Desconforto Térmico, e tem como base de análise os valores horários da temperatura do ar interior obtidos tanto por via experimental, *in situ*, como por via de simulação numérica.

As expressões traduzidas nas Equações 6.1 e 6.2 permitem calcular o valor do Indicador de Desconforto Térmico, de inverno e de verão, respetivamente:

$$D_{x,y}^i = \sum h_{x,y}^i \cdot \Delta t_{x,y}^i \quad (6.1)$$

em que

$D_{x,y}^i$: Indicador de Desconforto Térmico de inverno do cenário x na localização y - [h.°C]

$h_{x,y}^i$: Número de horas em que a temperatura do ar interior, na estação de aquecimento, é inferior à temperatura de conforto, no cenário x na localização y - [h]

$\Delta t_{x,y}^i$: Diferenças positivas entre a temperatura de conforto e a temperatura do ar interior, no cenário x na localização y - [°C]

$$D_{x,y}^v = \sum h_{x,y}^v \cdot \Delta t_{x,y}^v \quad (6.2)$$

em que

$D_{x,y}^v$: Indicador de Desconforto Térmico de verão do cenário x na localização y - [h.°C]

$h_{x,y}^v$: Número de horas em que a temperatura do ar interior, na estação de arrefecimento, é superior à temperatura de conforto, no cenário x na localização y - [h]

$\Delta t_{x,y}^v$: Diferenças positivas entre a temperatura do ar interior e a temperatura de conforto, no cenário x na localização y - [°C]

O índice x das Equações 6.1 e 6.2 identifica a solução em análise (varia de 1 a n), enquanto o índice y da referida equação identifica a localização geográfica (varia de 1 a n).

Nos Capítulos 6.5.2, 6.5.3 e 6.5.4 estabelece-se a aplicação da expressão de cálculo do Indicador de Desconforto Térmico, de inverno e de verão, às soluções de simulação numérica criadas, de forma respetiva, para efeito de avaliação da influência do coeficiente de transmissão térmica da fachada, do isolamento térmico pelo seu interior e da ventilação noturna, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo.

No Capítulo 6.5.5 são sintetizadas as principais conclusões.

6.5.2. CÁLCULO DO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO – INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA FACHADA

O estudo da influência do coeficiente de transmissão térmica da fachada no desempenho térmico de inverno e de verão foi estabelecido por comparação entre 4 soluções: a solução referente ao edifício reabilitado sem aplicação de isolamento na fachada ($U = 1.30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e as 3 soluções referentes ao edifício reabilitado, com aplicação de 3 espessuras de isolamento térmico pelo exterior da fachada opaca, 4 cm, 8 cm e 12 cm de XPS ($U = 0.54, 0.34$ e $0.25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, respetivamente).

Para efeito de aplicação das expressões de cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno e do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^i$ e $D_{x,y}^v$, respetivamente, às 4 soluções estudadas, procedeu-se à sua identificação com o índice “x”. As localizações geográficas foram identificadas com o índice “y”, de acordo com o representado no Quadro 6.15.

Quadro 6.15 - Identificação do Indicador de Desconforto Térmico para avaliação da influência do U da fachada

Índices “x” e “y” do Indicador de Desconforto Térmico	
Solução / índice “x”	Localização / índice “y”
S/ Isol. / x=1	Porto / y=1
4cm XPS / x=2	Lisboa / y=2
8cm XPS / x=3	Bragança / y=3
12cm XPS / x=4	Faro / y=4

6.5.2.1. INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO - INVERNO

Os gráficos da Figura 6.12 representam o Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, da solução “S/ Isol” (x=1), nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional. A temperatura de conforto térmico assinalada na representação gráfica (18 °C) corresponde ao valor mínimo preconizado para edifícios da Categoria III (habitação social), no modelo adaptativo da EN 15251 (CEN, 2007).

O Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, calculado varia entre um valor nulo, em Faro ($D_{1,4}^i = 0 \text{ h.}^\circ\text{C}$) e um valor superior a 10000 h.°C, em Bragança ($D_{1,3}^i = 10083.5 \text{ h.}^\circ\text{C}$). Em Lisboa o valor é claramente inferior a 500 h.°C ($D_{1,2}^i = 101.3 \text{ h.}^\circ\text{C}$). No Porto o valor é superior 500 h.°C, mas inferior a 1000 h.°C ($D_{1,1}^i = 919.4 \text{ h.}^\circ\text{C}$).

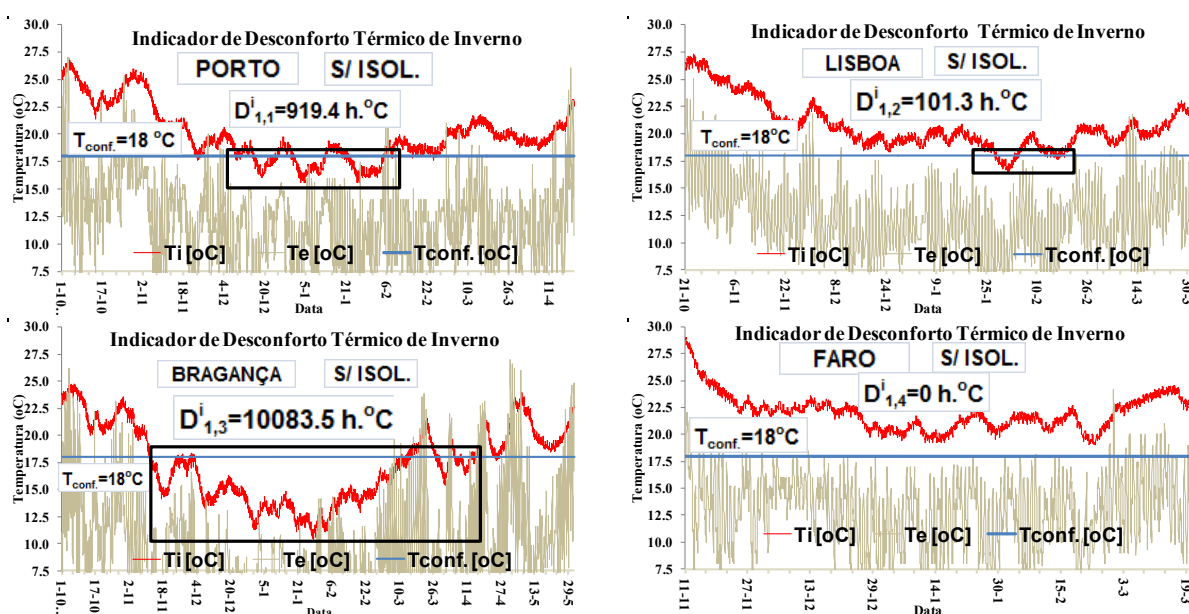


Figura 6.12 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução “S/ Isol.”

Os gráficos da Figura 6.13 representam o Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, da solução “4 cm XPS” (x=2), nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

O Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, da solução “4 cm XPS” é nulo em Faro ($D_{2,4}^i = 0 \text{ h.}^\circ\text{C}$) e inferior a 10000 h.°C em Bragança ($D_{2,3}^i = 7996.6 \text{ h.}^\circ\text{C}$). Em Lisboa reduz-se a um valor inferior a 100 h.°C ($D_{2,2}^i = 7.3 \text{ h.}^\circ\text{C}$). No Porto, o valor obtido diminuiu para um valor claramente inferior 500 h.°C ($D_{2,1}^i = 377.6 \text{ h.}^\circ\text{C}$).

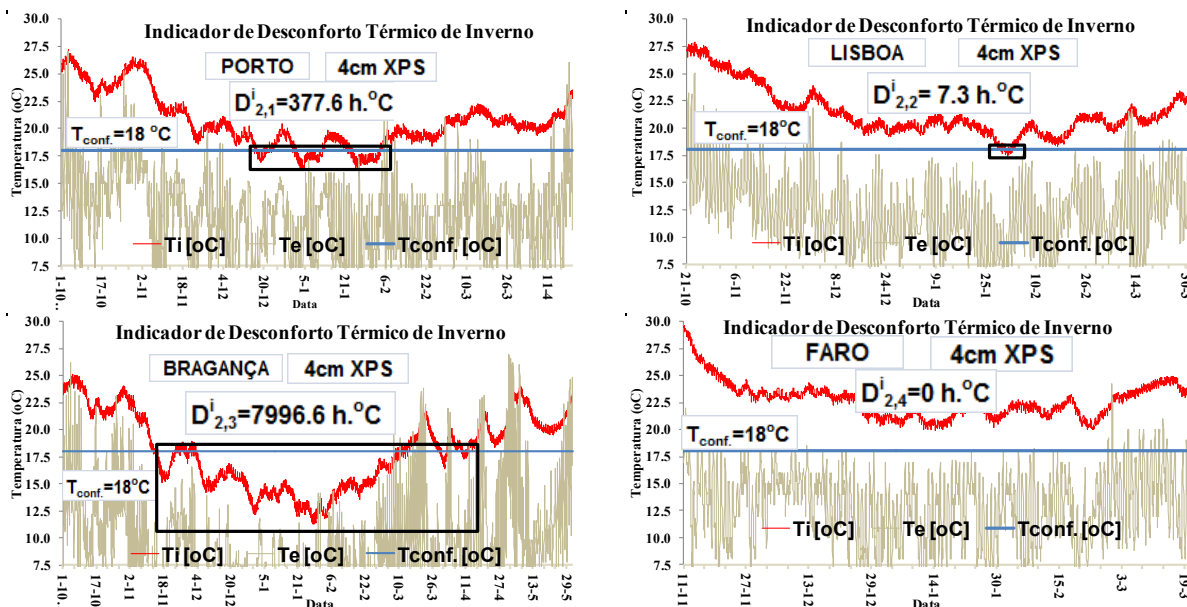


Figura 6.13 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução “4 cm XPS”

Os gráficos da Figura 6.14 representam o Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D^i_{x,y}$, da solução “8 cm XPS” ($x=3$), nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

O Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D^i_{x,y}$, da solução “8 cm XPS” é nulo em Faro ($D^i_{3,4} = 0 \text{ h.}^\circ\text{C}$), quase nulo em Lisboa ($D^i_{3,2} = 1.4 \text{ h.}^\circ\text{C}$), claramente inferior a 500 $\text{h.}^\circ\text{C}$ no Porto ($D^i_{3,1} = 240.0 \text{ h.}^\circ\text{C}$) e bastante elevado em Bragança ($D^i_{3,3} = 7363.6 \text{ h.}^\circ\text{C}$).

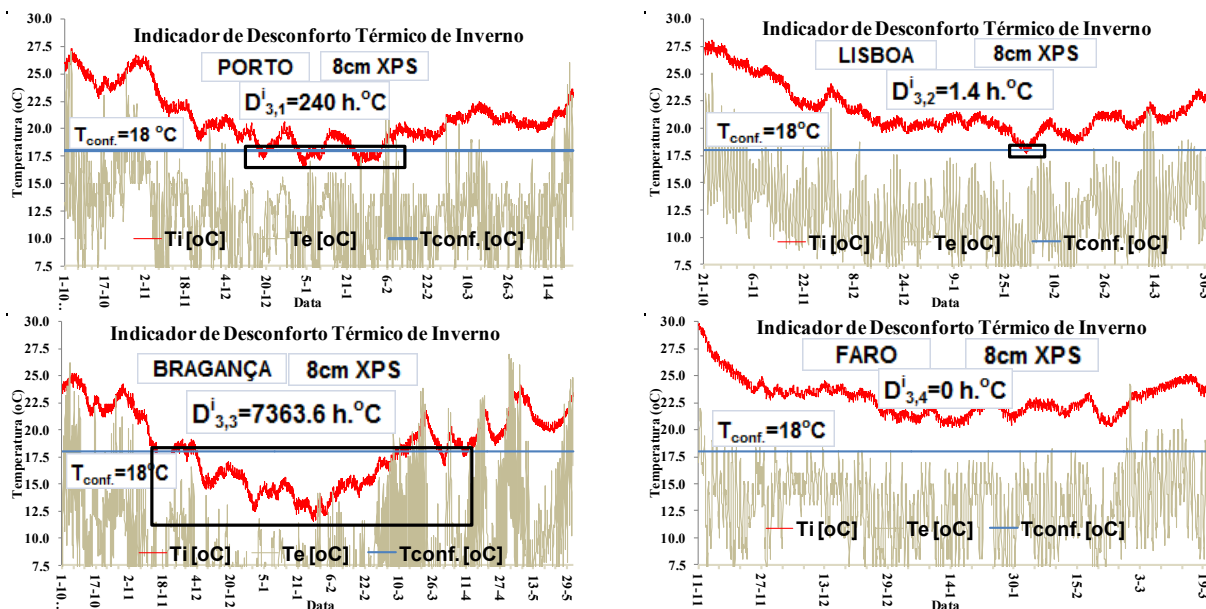


Figura 6.14 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução “8 cm XPS”

Os gráficos da Figura 6.15 representam o Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D^i_{x,y}$, da solução “12 cm XPS” ($x=4$), nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

O Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D^i_{x,y}$, da solução “12 cm XPS” apresenta valores próximos dos obtidos para a solução “8 cm XPS”. É nulo em Faro ($D^i_{3,4} = 0 \text{ h.}^\circ\text{C}$), quase nulo em

Lisboa ($D_{4,2}^i = 0.5 \text{ h.}^\circ\text{C}$), inferior a $200 \text{ h.}^\circ\text{C}$ no Porto ($D_{4,1}^i = 181.9 \text{ h.}^\circ\text{C}$) e superior a $7000 \text{ h.}^\circ\text{C}$ em Bragança ($D_{4,3}^i = 7052.1 \text{ h.}^\circ\text{C}$).

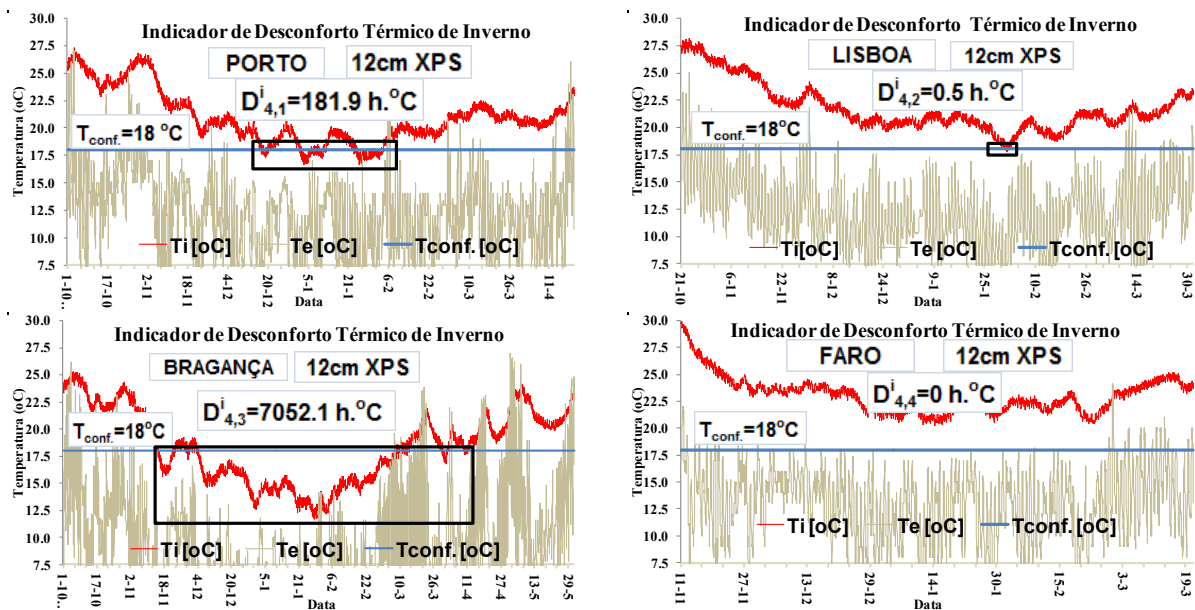


Figura 6.15 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução “12 cm XPS”

6.5.2.2. INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO - VERÃO

Os gráficos da Figura 6.16 representam o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “S/ Isol.” nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional. A temperatura de conforto térmico assinalada na representação gráfica (27°C), corresponde ao limite de aceitabilidade preconizado para edifícios da Categoria III (habitação social), à luz da EN 15251 (CEN, 2007).

O Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, varia entre um valor nulo no Porto ($D_{1,1}^v = 0 \text{ h.}^\circ\text{C}$) e um valor próximo de $3000 \text{ h.}^\circ\text{C}$ em Faro ($D_{1,4}^v = 2934 \text{ h.}^\circ\text{C}$). Em Lisboa o valor é próximo de $1500 \text{ h.}^\circ\text{C}$ ($D_{1,2}^v = 1497.4 \text{ h.}^\circ\text{C}$) e em Bragança inferior a $1000 \text{ h.}^\circ\text{C}$ ($D_{1,3}^v = 709.4 \text{ h.}^\circ\text{C}$).

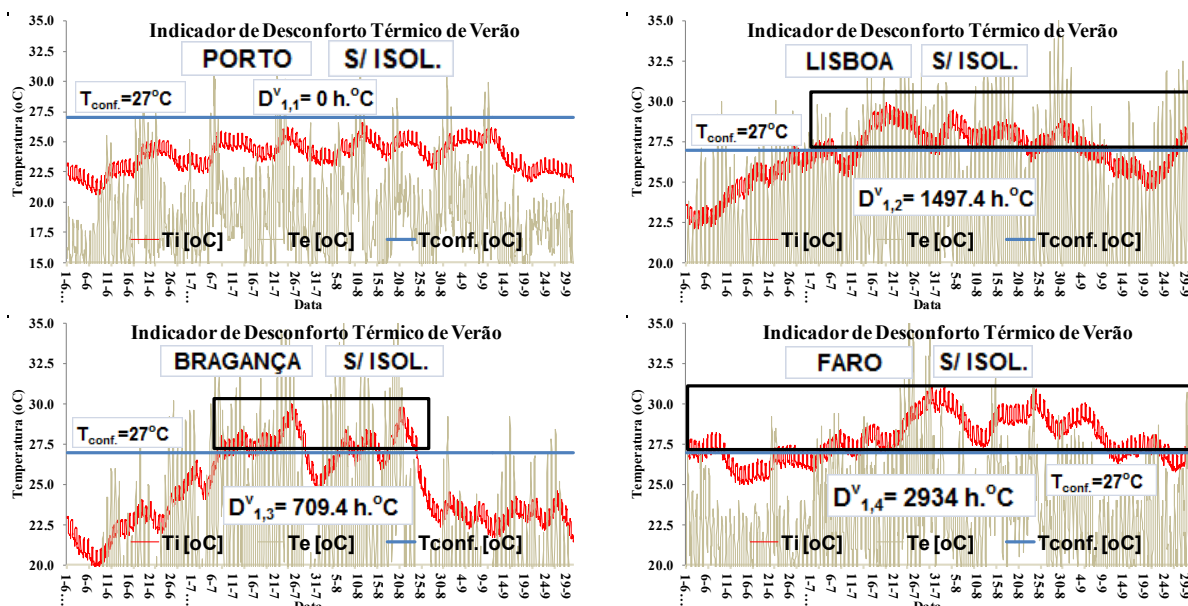


Figura 6.16 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “S/ Isol.”

Os gráficos da Figura 6.17 representam o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “4 cm XPS”, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

Os valores do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “4 cm XPS” são, de um modo geral, próximos dos da solução “S/ Isol.”. Assume um valor nulo no Porto ($D_{2,1}^v = 0 \text{ h.}^\circ\text{C}$) e um valor superior a 3000 $\text{h.}^\circ\text{C}$ em Faro ($D_{2,4}^v = 3041.8 \text{ h.}^\circ\text{C}$). Em Lisboa, o valor é próximo de 2000 $\text{h.}^\circ\text{C}$ ($D_{2,2}^v = 1829.5 \text{ h.}^\circ\text{C}$) e em Bragança inferior a 1000 $\text{h.}^\circ\text{C}$ ($D_{2,3}^v = 668.5 \text{ h.}^\circ\text{C}$). A comparação entre as soluções “S/ Isol.” e “4 cm XPS” permite observar um agravamento do desconforto térmico de verão em Lisboa e Faro, e um desagramento muito ligeiro em Bragança. No Porto, o seu valor é nulo para ambas as soluções.

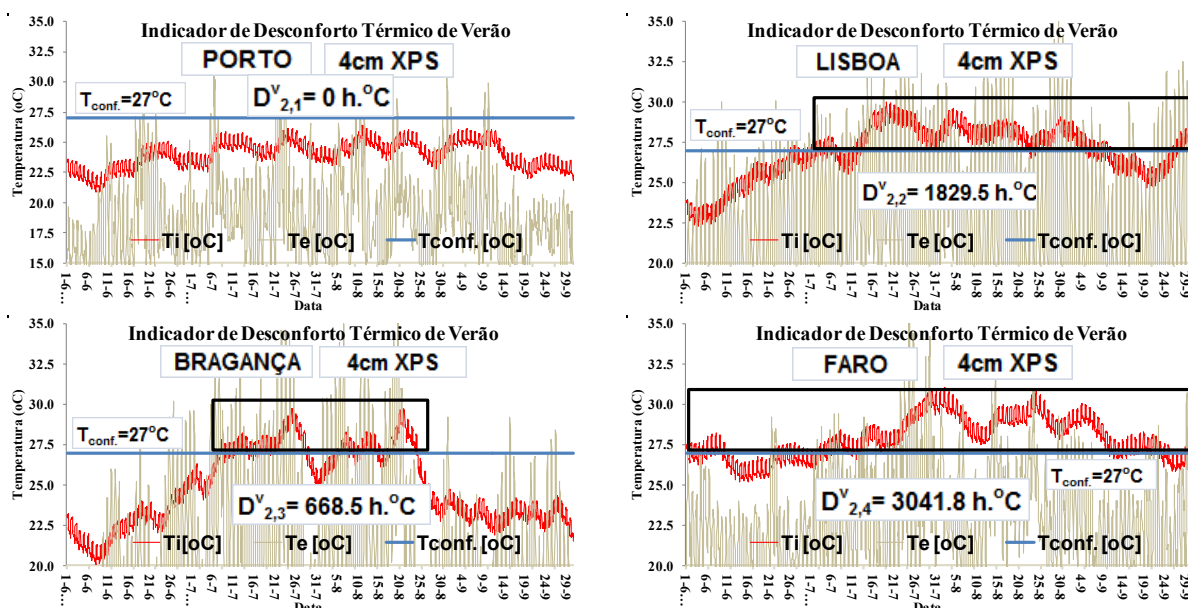


Figura 6.17 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “4 cm XPS”

Os gráficos da Figura 6.18 representam o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “8 cm XPS”, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

A tendência observada na solução “8cm XPS” é similar à descrita na solução “4 cm XPS”. Há um agravamento do valor do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, em Lisboa ($D_{3,2}^v = 1925.1$ h.°C) e Faro ($D_{3,4}^v = 3096.8$ h.°C) e um ligeiro desagravamento do seu valor em Bragança ($D_{3,3}^v = 662.7$ h.°C). No Porto, o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, tem um valor nulo ($D_{3,1}^v = 0$ h.°C).

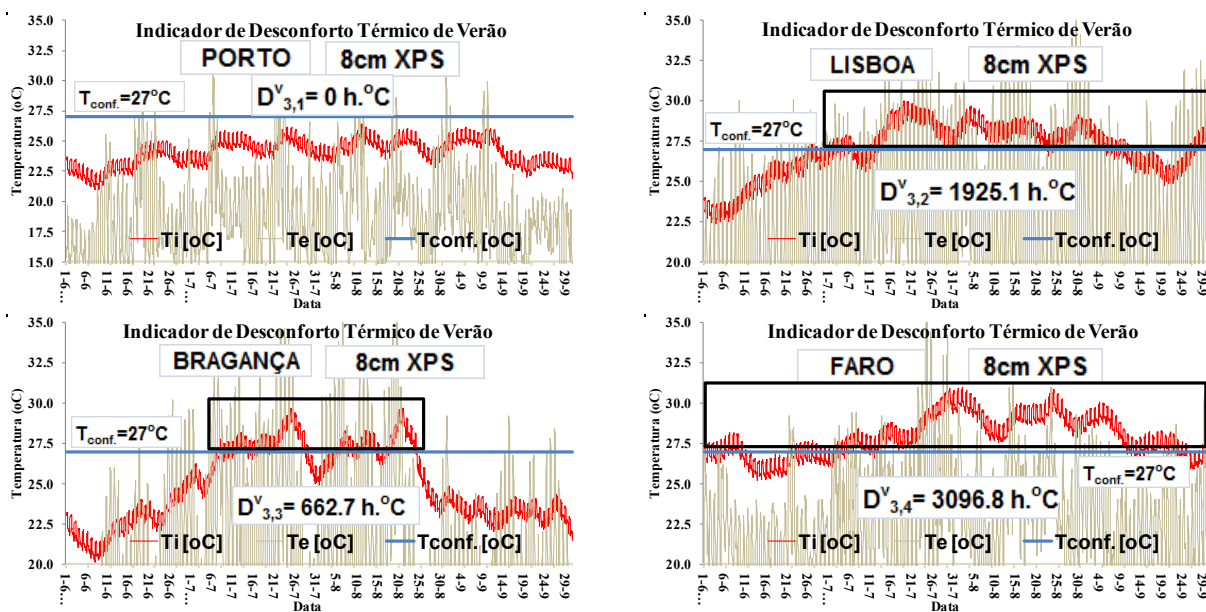


Figura 6.18 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “8 cm XPS”

Os gráficos da Figura 6.19 representam o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “12 cm XPS”, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

A tendência observada na solução “12 cm XPS” é similar à descrita nas soluções “8 cm XPS” e “4 cm XPS”. É evidente um agravamento do seu valor em Lisboa ($D_{4,2}^v = 1972.3$ h.°C) e Faro ($D_{4,4}^v = 3124.5$ h.°C) e um ligeiro desagravamento em Bragança ($D_{4,1}^v = 660.5$ h.°C). No Porto, o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, tem um valor nulo ($D_{4,1}^v = 0$ h.°C).

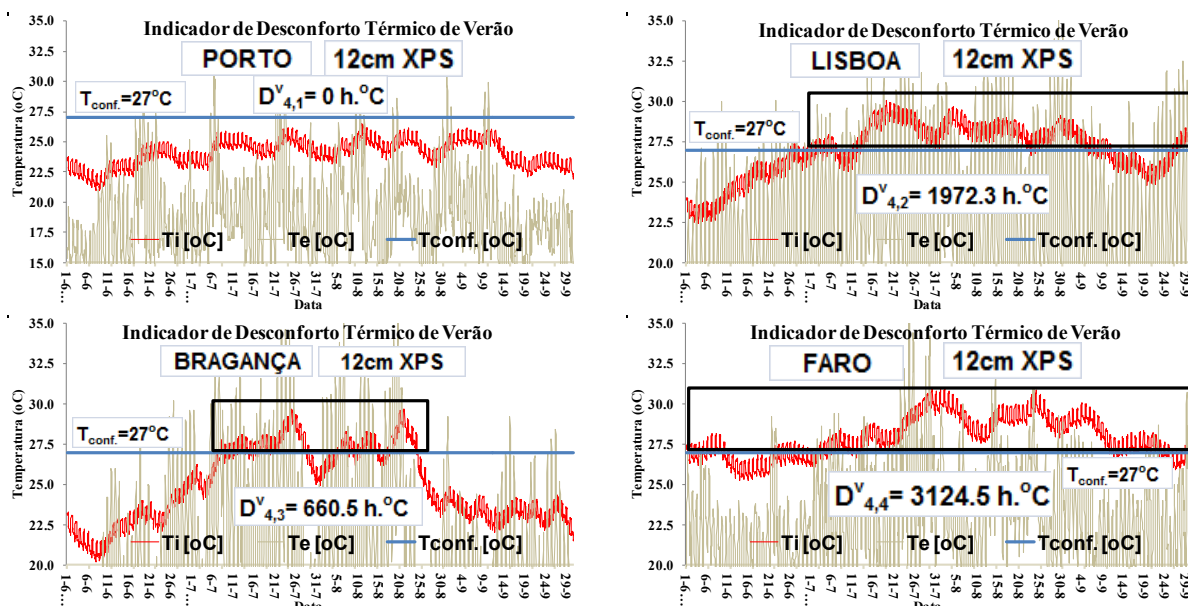


Figura 6.19 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “12 cm XPS”

6.5.3. CÁLCULO DO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO – INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO PELO INTERIOR DA FACHADA

O estudo da influência do isolamento pelo interior da fachada, no desempenho térmico de inverno e de verão, foi estabelecido por comparação entre duas soluções: uma solução de isolamento térmico pelo exterior, com 4 cm de XPS, e outra de isolamento térmico pelo interior, com espessura de isolamento idêntica.

Para efeito de aplicação das expressões de cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno e do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^i$ e $D_{x,y}^v$ respetivamente, à solução criada para avaliação da influência do isolamento térmico pelo interior da fachada, no conforto térmico do Apartamento-Tipo, procedeu-se à sua identificação com o número 5. A solução “x=5” corresponde à solução referente ao isolamento térmico da fachada opaca, pelo seu interior, com 4 cm de isolamento, “4 cm XPS - Isol.Int”. Tal como para as 4 soluções anteriores, as localizações geográficas foram identificadas com o índice “y”, de acordo com o representado no Quadro 6.15.

6.5.3.1. INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO - INVERNO

Os gráficos da Figura 6.20 representam o Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, da solução “4 cm XPS - Isol.Int”, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

A comparação dos valores do Indicador de Desconforto Térmico de Inverno, $D_{x,y}^i$, entre as soluções “4 cm XPS” e “4 cm XPS - Isol.Int” permite avaliar o efeito do isolamento térmico pelo interior, no desconforto térmico de inverno do Apartamento-Tipo em análise.

O Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, da solução “4 cm XPS - Isol.Int”, mantém-se nulo em Faro ($D_{5,4}^i = 0$ h.°C), contudo atinge valores mais elevados nas restantes localizações. No Porto atinge 391.2 h.°C ($D_{2,1}^i = 377.6$ h.°C, na solução “4 cm XPS”), em Bragança atinge 8335.7 h.°C ($D_{2,3}^i = 7996.6$ h.°C na solução “4 cm XPS”) e em Lisboa atinge 12.3 h.°C ($D_{2,2}^i = 7.3$ h.°C na solução “4 cm XPS”).

O aumento do valor do Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, traduz um incremento do desconforto térmico da solução de isolamento pelo interior, face à solução de isolamento pelo exterior, no Porto, em Lisboa e em Bragança. Em Faro, o desconforto térmico de inverno é nulo para ambas as soluções.

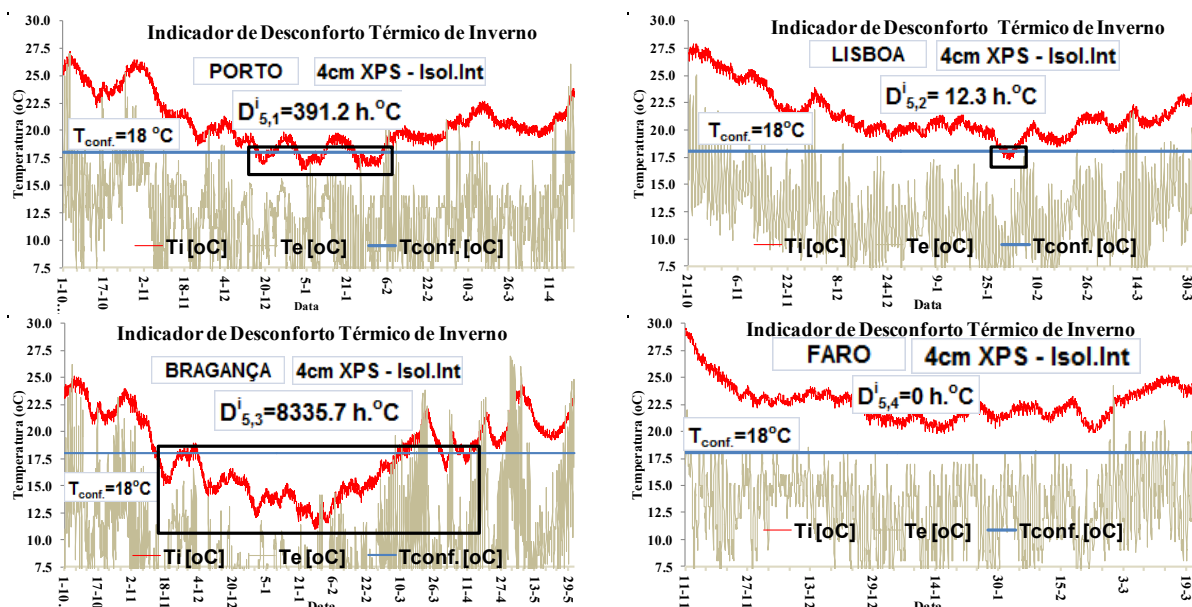


Figura 6.20 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno da solução. “4 cm XPS - Isol.Int”

6.5.3.2. INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO - VERÃO

Os gráficos da Figura 6.21 representam o Indicador de Desconforto Térmico no verão, $D_{x,y}^v$, da solução “4 cm XPS - Isol.Int”, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

À semelhança do efetuado no inverno (Capítulo 6.5.3.1), a comparação dos valores do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, entre as soluções “4 cm XPS” e “4 cm XPS - Isol.Int” permite avaliar o efeito do isolamento térmico pelo interior, no desconforto térmico de verão do Apartamento-Tipo em análise.

Os valores do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “4 cm XPS - Isol.Int” são sempre superiores aos da solução “4 cm XPS”, o que indicia um agravamento do desconforto térmico de verão. No Porto assume um valor de 1.1 h.°C ($D_{2,1}^v = 0$ h.°C), em Lisboa um valor de 2206.1 h.°C ($D_{2,2}^v = 1829.5$ h.°C), em Bragança de 1142.1 h.°C ($D_{2,3}^v = 668.5$ h.°C) e em Faro de 3522.8 h.°C ($D_{2,4}^v = 3041.8$ h.°C).

A diferença no valor do Indicador de Desconforto Térmico no verão, $D_{x,y}^v$, para a solução de isolamento pelo interior é mais acentuada em Faro (481.0 h.°C), do que em Lisboa (376.6 h.°C) e Bragança (473.6 h.°C).

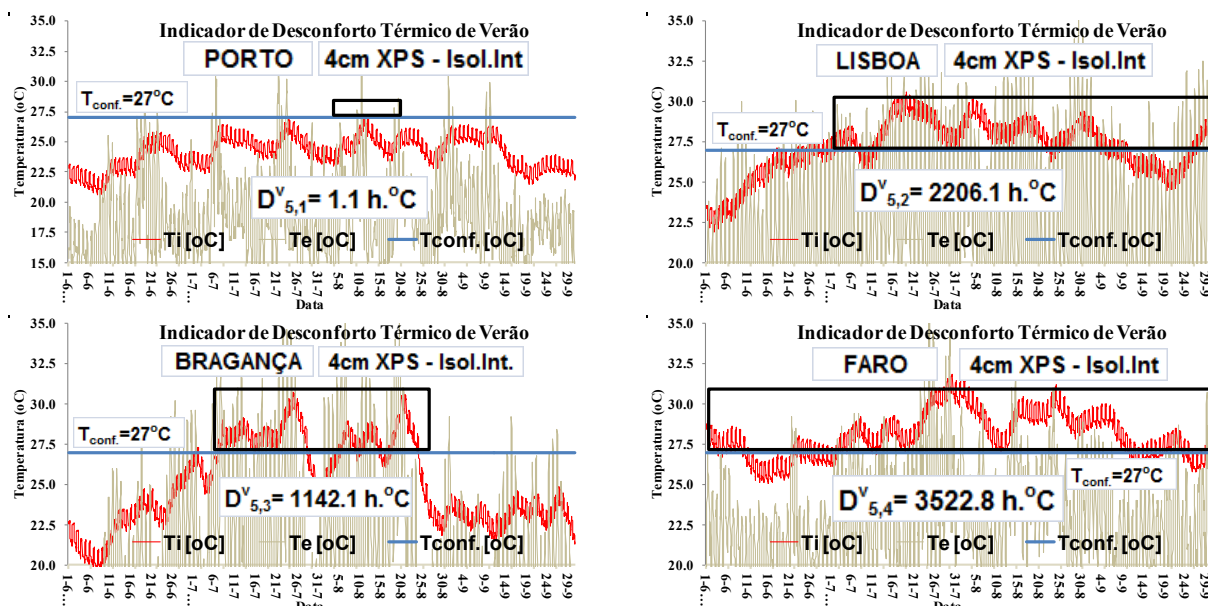


Figura 6.21 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “4 cm XPS - Isol.Int”

6.5.4. CÁLCULO DO INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO – INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO NOTURNA

A avaliação da influência da ventilação noturna no desempenho térmico de verão foi estabelecida tendo como base de análise duas soluções distintas: a solução referente ao edifício reabilitado, sem ventilação noturna, e a mesma solução com ventilação noturna, no período noturno, entre as 0 e as 8 horas, com uma taxa de renovação de ar igual a 5 h^{-1} .

Para efeito de aplicação das expressões de cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, às soluções estudadas para avaliação da influência da ventilação noturna, no conforto térmico de verão do Apartamento-Tipo, procedeu-se à sua identificação com os números 6 e 7: a solução “x=6” corresponde à solução “Sem Vent.Noturna” e a solução “x=7” corresponde à solução “Com Vent.Noturna”. As localizações geográficas foram identificadas com o índice “y”, de acordo com o representado no Quadro 6.15.

6.5.4.1. INDICADOR DE DESCONFORTO TÉRMICO - VERÃO

Os gráficos da Figura 6.22 representam o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “Sem Vent. Noturna”, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional.

Os valores do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “Sem Vent. Noturna” em Lisboa e Faro (1497.4 h.°C e 2934.0 h.°C, respetivamente), são superiores aos registados no Porto e em Bragança (0.0 h.°C e 709.4 h.°C, respetivamente) o que evidencia um cenário de maior desconforto térmico de verão da solução sem ventilação noturna, a sul de Portugal.

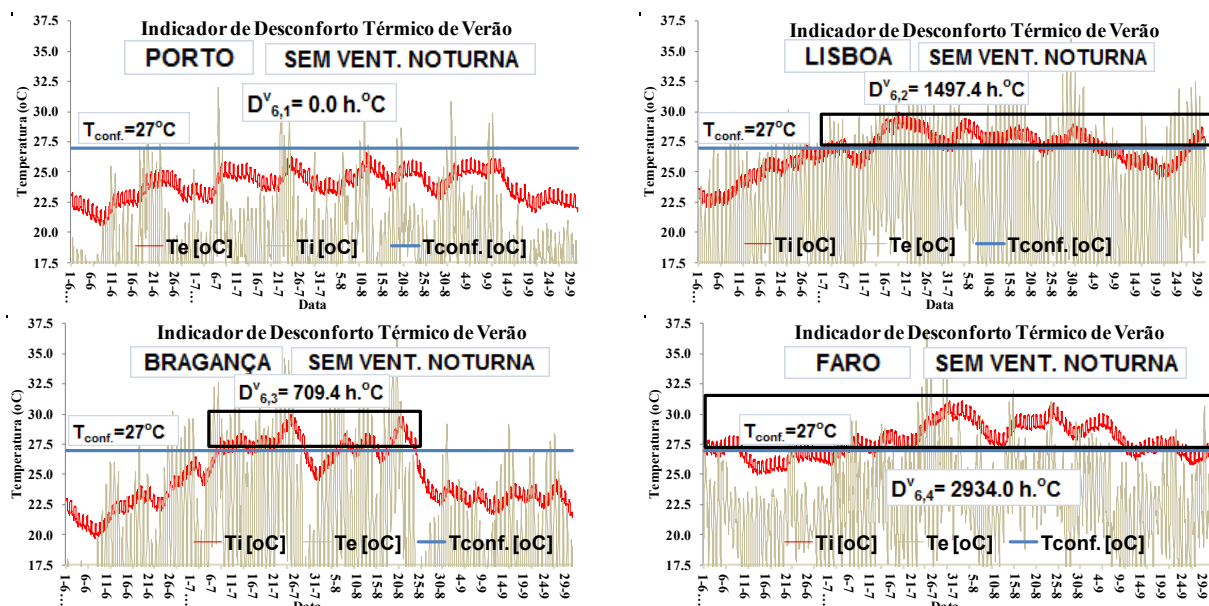


Figura 6.22 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “Sem Vent. Noturna”

Os gráficos da Figura 6.23 representam o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “Com Vent. Noturna”, nas 4 localizações geográficas representativas do território nacional. Os valores do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, da solução “Com Vent. Noturna” reduzem-se drasticamente face aos valores da solução sem ventilação noturna, reduzindo-se por completo o desconforto térmico de verão. Em Lisboa obtém-se um valor de 6.7 h.°C (redução de 1490.7 h.°C), em Bragança de 9.8 h.°C (redução de 699.6 h.°C) e em Faro de 366.4 h.°C (redução de 2567.6 h.°C). No Porto o desconforto térmico de verão é nulo, com ou sem a ventilação noturna.

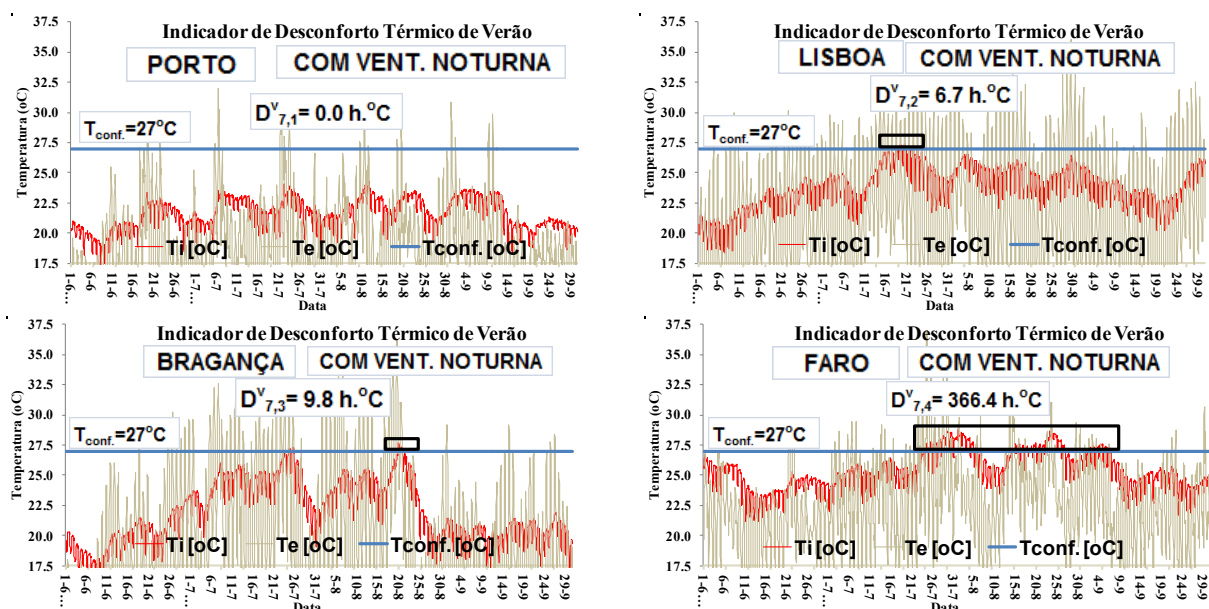


Figura 6.23 – Cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão da solução “Com Vent. Noturna”

6.5.5. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um indicador de avaliação do desconforto térmico de inverno e de verão ($D_{x,y}^i$ e $D_{x,y}^v$, respetivamente), e procedeu-se à sua aplicação a um conjunto de soluções estudadas para avaliar a influência do isolamento térmico da fachada do edifício e da ventilação noturna, no conforto térmico do Apartamento-Tipo, em 4 localizações geográficas do território nacional.

O cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, e do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, possibilitou a análise comparativa das soluções de isolamento térmico da fachada e de ventilação noturna, tendo conduzido à sua representação gráfica no mapa de Portugal. Os resultados assim obtidos permitem extrair as seguintes conclusões:

- O cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, para avaliação da influência do coeficiente de transmissão térmica da fachada no desempenho térmico do Apartamento-Tipo, permitiu identificar 3 situações distintas, nos 4 locais do território de Portugal estudados, de acordo com o representado na Figura 6.24: em Faro, o Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D_{x,y}^i$, apresenta um valor nulo, nas 4 soluções estudadas, no Porto e em Lisboa apresenta um valor sempre inferior a 1000 h.°C e em Bragança o valor das 4 soluções é sempre superior a 1000 h.°C. Na solução sem isolamento térmico na fachada, o valor é inclusive superior a 10000 h.°C, o que configura uma situação de elevado desconforto térmico;

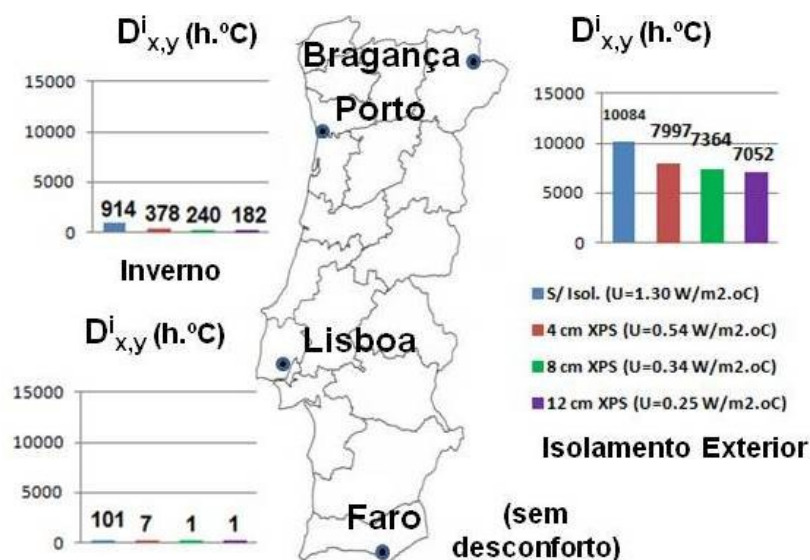


Figura 6.24 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de inverno – 4 soluções de U

- Tal como para o inverno, o cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, para avaliação da influência do coeficiente de transmissão térmica da fachada no desempenho térmico de verão, permitiu identificar 3 situações distintas, de acordo com o representado na Figura 6.25: no Porto, o desconforto térmico de verão é nulo nas 4 soluções, em Bragança é inferior a 1000 h.°C e em Lisboa e Faro, o Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D_{x,y}^v$, apresenta, para as 4 soluções, valores sempre superiores a 1000 h.°C;

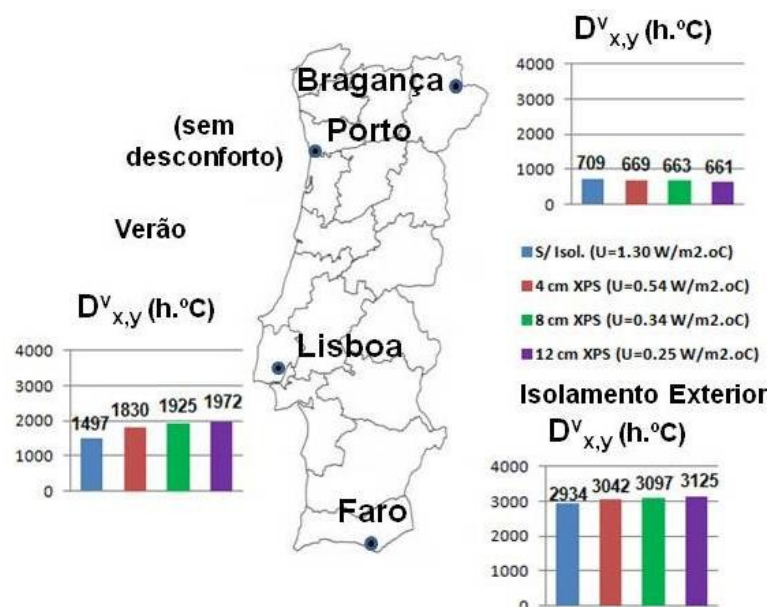


Figura 6.25 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de verão – 4 soluções de U

- O cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de inverno, $D^i_{x,y}$, para avaliação da influência do isolamento pelo interior da fachada, no desempenho térmico de inverno do Apartamento-Tipo, permitiu identificar um aumento do desconforto da solução de isolamento pelo interior, face à solução de isolamento pelo exterior, no Porto, em Lisboa em Bragança. Em Faro, não se regista desconforto térmico em ambas as soluções (Figura 6.26);

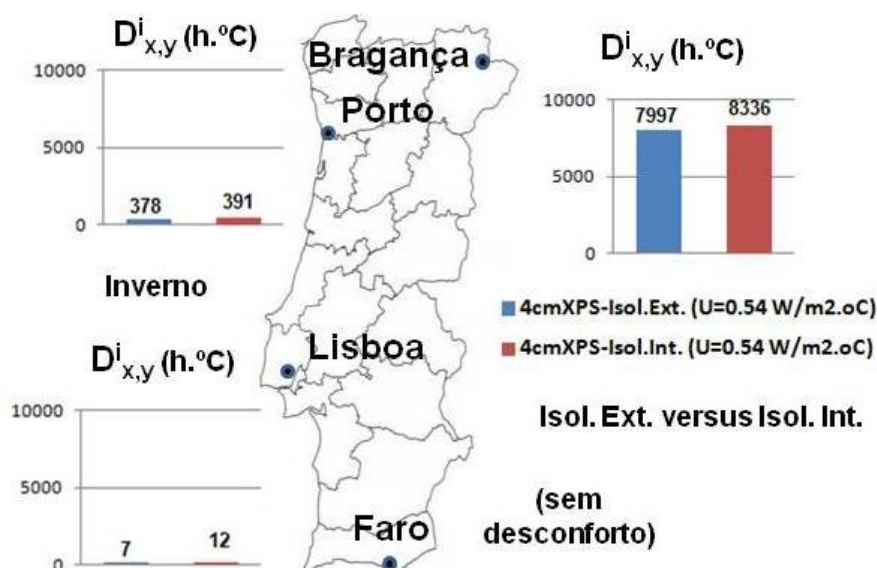


Figura 6.26 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de inverno – Isolamento pelo interior

- O cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D^v_{x,y}$, para avaliação da influência do isolamento pelo interior da fachada, no desempenho térmico de verão do Apartamento-Tipo, permitiu, tal como para o inverno, identificar um agravamento do desconforto térmico de verão, em todos os locais, na solução de isolamento pelo interior da fachada. Essa situação é particularmente evidente em Lisboa, Faro e Bragança, onde valor do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D^v_{x,y}$, na solução de isolamento pelo interior, ultrapassa o valor de 1000 h.°C (Figura 6.27);

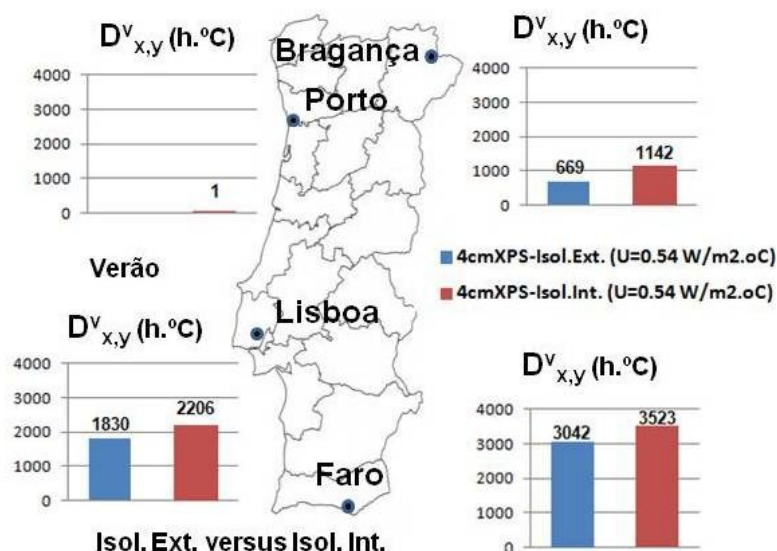


Figura 6.27 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de verão – Isolamento pelo interior

- O cálculo do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D^v_{x,y}$, para avaliação da influência da ventilação noturna no desempenho térmico de verão do Apartamento-Tipo, permitiu constatar um efeito particularmente favorável no sul de Portugal, em Lisboa e Faro, com redução do indicador, a um valor quase nulo, em Lisboa, e a cerca de 1/10 do valor sem ventilação noturna, em Faro. Em Bragança o efeito é igualmente positivo, e no Porto, o valor do Indicador de Desconforto Térmico de verão, $D^v_{x,y}$, é nulo, mesmo na ausência de ventilação noturna (Figura 6.28).

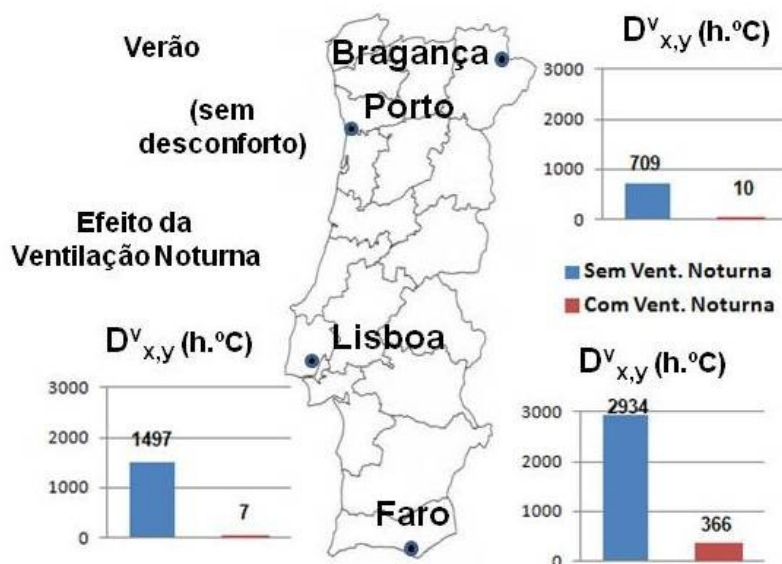


Figura 6.28 – Representação gráfica do Indicador de Desconforto Térmico de verão – Ventilação noturna

6.6. CONCLUSÕES

Nos Capítulos 6.2, 6.3 e 6.4 foi avaliada a influência do isolamento térmico da fachada opaca do edifício e da ventilação noturna, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo. Para o efeito foram estudadas um conjunto de soluções de isolamento da fachada, tanto pelo exterior como pelo interior, e de implementação da ventilação noturna, tendo sido estabelecida uma análise comparativa dos resultados obtidos. No início de cada capítulo foram formuladas um conjunto de questões cuja resposta foi sintetizada no seu final, após desenvolvimento do estudo de comparação das soluções.

No Capítulo 6.5 foram desenvolvidos 2 indicadores de desempenho (o Indicador de Desconforto Térmico de inverno e o Indicador de Desconforto Térmico de verão), que tendo como base de análise os valores horários da temperatura do ar interior, avaliam o desconforto térmico de inverno e de verão. Para validação dos indicadores de desempenho desenvolvidos, foi aplicado o seu cálculo às soluções de isolamento da fachada opaca e de ventilação noturna, estudadas nos Capítulos 6.2, 6.3 e 6.4.

O estudo desenvolvido nos Capítulos 6.1 a 6.5 permite sintetizar um conjunto de recomendações de isolamento térmico das paredes e de ventilação noturna, a adotar na reabilitação de edifícios de habitação social:

- 1) Sempre que as práticas de aquecimento ambiente sejam nulas ou diminutas, como é situação corrente em edifícios de habitação social, a aplicação de isolamento térmico na envolvente opaca exterior traduz-se numa redução da percentagem de horas desconforto térmico, na Categoria III da EN 15251 que não excede 10 % da duração da estação de aquecimento no Porto, em Lisboa e em Faro.** Em Bragança, tanto a percentagem de desconforto térmico de inverno (55 %), como a energia de aquecimento necessário à sua obtenção (37.5 kWh/m²), são elevados na solução de não isolamento das paredes opacas. Em regime térmico de verão, a aplicação de isolamento térmico nas paredes exteriores, traduz-se num aumento do desconforto térmico em Lisboa e em Faro. Preconiza-se, desta forma, o isolamento das paredes exteriores em edifícios de habitação social em Bragança, e dispensa-se a sua aplicação no Porto, em Faro e Lisboa;
- 2) A aplicação de isolamento térmico pelo interior da fachada opaca, em edifícios de habitação social, traduz-se comparativamente à solução sem isolamento térmico, numa redução do desconforto térmico de inverno, e num aumento do desconforto térmico de verão, nas 4 localizações estudadas (Porto, Lisboa, Bragança e Faro).** O investimento que resulta em isolar pelo interior deve ser devidamente ponderado, pois por um lado pode conduzir a um benefício no inverno, mas por outro a um claro aumento do desconforto no verão, devido ao sobreaquecimento gerado;
- 3) O efeito da ventilação noturna na redução do desconforto térmico de verão é particularmente evidente na região sul de Portugal (Lisboa e Faro).** É possível definir um valor-limite da taxa de renovação de ar igual a 4 h⁻¹, a partir do qual a redução do desconforto térmico de verão não é significativa.

7

CONCLUSÕES

7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios residenciais reabilitados são preocupações da sociedade em geral, e da comunidade científica em particular.

A redução acentuada da construção de novos edifícios residenciais nos últimos anos tem sido acompanhado por um crescimento muito moderado do número de edifícios reabilitados (INE, 2011). Os edifícios de habitação social, dados os reduzidos consumos energéticos evidenciados, são um caso particular no contexto dos edifícios residenciais a reabilitar. O estrato socioeconómico da população residente nos bairros de habitação social deve condicionar, à partida, a estratégia de reabilitação que se venha a implementar. As soluções a aplicar deverão, neste contexto, privilegiar o conforto térmico, numa perspetiva de ausência de consumos energéticos de aquecimento e de arrefecimento. A estratégia de reabilitação deve fundamentalmente centrar-se no conforto térmico passivo com reduzidos consumos de energia e na correção de situações anómalas (patologia construtiva e ambiental) (Pina dos Santos, 2012).

Perante a falta de enquadramento regulamentar dos edifícios de habitação social, procurou desenvolver-se um estudo que permitisse atingir 4 objetivos primordiais:

- 1) Caracterizar o desempenho em serviço dos edifícios de habitação social reabilitados;
- 2) Validar um modelo de simulação numérica com resultados experimentais que servisse de base ao desenvolvimento de estudos de sensibilidade;
- 3) Desenvolver estudos de sensibilidade para avaliação do conforto térmico e da eficiência energética de um conjunto de cenários de simulação que traduzam estratégias de reabilitação, em 4 localizações representativas do território nacional, tomando como Caso de Estudo, um Apartamento-Tipo de um conjunto de habitação social reabilitado;
- 4) Desenvolver um indicador de desempenho térmico (Indicador de Desconforto Térmico - $D_{x,y}$) para avaliação da influência do isolamento das paredes de fachada e da ventilação noturna, no conforto térmico. Proceder à representação gráfica no mapa de Portugal das soluções de reabilitação estudadas, tendo como base o cálculo do valor do Indicador de Desconforto Térmico de inverno e de verão. Por fim, sintetizar um conjunto de recomendações a aplicar na reabilitação de paredes de fachada e da ventilação noturna, de forma incrementar o conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios de habitação social, em reabilitações futuras.

7.2. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

O trabalho desenvolvido permitiu estudar o conforto térmico e a eficiência energética de um conjunto de habitação social reabilitado, em condições de serviço, tendo como base de análise um conjunto alargado de medições de parâmetros de avaliação do desempenho térmico. A partir dessa caracterização experimental, validou-se um modelo de simulação numérica, em regime dinâmico, de um Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional reabilitado (apartamento de tipologia T3, tipologia dominante do conjunto habitacional, ocupado por 5 residentes, implantado no 4.º piso do edifício) e desenvolveram-se estudos de sensibilidade para um conjunto de cenários alternativos de reabilitação, em 4 locais do território nacional. Por fim avaliou-se o efeito do isolamento térmico das paredes de fachada do edifício e da ventilação noturna, no conforto térmico e na eficiência energética do Apartamento-Tipo e calculou-se, para um conjunto de soluções, o Indicador do Desconforto Térmico de inverno e de verão ($D_{x,y}^i$ e $D_{x,y}^v$ respetivamente), incluindo a sua representação gráfica no mapa de Portugal. Para terminar foram definidas um conjunto de recomendações de isolamento das paredes de fachada e da ventilação noturna a aplicar na reabilitação de edifícios de habitação social.

De forma complementar, dado ter sido obtido um conjunto alargado de resultados de medição, foi desenvolvido um estudo da variabilidade do desempenho térmico e da permeabilidade ao ar, em condições de serviço, da amostra de apartamentos instrumentada, para diferentes condições de utilização dos apartamentos.

As conclusões mais significativas retiradas dos estudos efetuados são as seguintes:

- 1) **O estudo do conforto térmico do Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional de Lordelo, à luz da Categoria III do modelo de conforto adaptativo da norma EN 15251, veio evidenciar uma situação de conforto térmico no verão, e uma situação de desconforto térmico no inverno, que atinge, no máximo, cerca de 40 % da duração da estação de aquecimento do Porto.** Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a aplicação de uma cobertura bem isolada, de envidraçados com um elevado desempenho térmico e proteção solar exterior, a adoção de dispositivos de ventilação mecânica coletiva nas cozinhas, com funcionamento centralizado, e de dispositivos de ventilação mecânica individual nos WC's, constituem soluções que num clima temperado como o da cidade do Porto, permitem garantir o conforto térmico na estação de arrefecimento e durante uma parte considerável da estação de aquecimento;
- 2) **As medições efetuadas mostraram que a temperatura do ar interior do Apartamento-Tipo flutua, ao longo do ano, dentro dos limites de aceitabilidade especificados na norma EN 15251, para edifícios da Categoria III (entre 18 °C e 27 °C).** Registam-se em alguns períodos valores da temperatura do ar interior inferiores a 18 °C, no inverno, e superiores a 27 °C, no verão (38.6 % e 12.2 % da duração das estações de aquecimento e de arrefecimento, respetivamente);
- 3) **O estudo da variabilidade do desempenho térmico numa amostra de 24 apartamentos instrumentados, em condições de serviço, nos períodos de verão e de inverno, evidenciou uma flutuação máxima do valor da temperatura do ar interior de 3 °C, com a variação do fator de forma e da ocupação dos apartamentos, e de 1.6 °C, com a variação da sua localização em prumada;**
- 4) **As medições da concentração de dióxido de carbono (CO₂) do Apartamento-Tipo revelaram valores muito elevados nos quartos, com a admissão de ar novo a níveis muito abaixo do desejável. Os valores medidos ultrapassam 2500 ppm em 50 % do período de**

ocupação do quarto instrumentado. A aplicação de grelhas autorreguláveis nas caixas de estores, não garante, por si só, uma adequada renovação de ar, na ausência de um sistema mecânico de extração a funcionar na cozinha conforme projetado. Os resultados obtidos permitem concluir que a renovação de ar dos quartos dos apartamentos é deficiente devido à alteração, pelos ocupantes, do sistema de exaustão nas cozinhas;

5) Propõe-se a criação de um regulamento de desempenho térmico específico para reabilitação de edifícios de habitação, onde no caso dos edifícios de habitação social, se venha a preconizar a aplicação de um modelo de conforto térmico adaptativo para avaliação do desempenho. O estudo desenvolvido na Tese, de caracterização do desempenho em serviço de uma amostra representativa de apartamentos do conjunto habitacional de Lordelo, torna evidente que as exigências regulamentares de conforto térmico não se adequam ao estudo do conforto em edifícios de habitação de social. A simples apresentação de 2 valores de temperatura de referência, para o inverno e para o verão, constitui uma abordagem bastante simplista da questão. A aplicação de um modelo de conforto térmico adaptativo constituiria uma resposta, que para além de incorporar um maior número de variáveis na avaliação do conforto térmico, garantiria aos ocupantes do apartamento uma maior flexibilidade na sua utilização;

6) As principais conclusões do estudo de sensibilidade desenvolvido no Capítulo 5 são as seguintes:

- a) A reabilitação construtiva do edifício permitiria melhorar o desempenho térmico e energético do Apartamento-Tipo, no inverno e no verão, nas 4 localizações geográficas estudadas;**
- b) A percentagem de desconforto térmico de inverno, à luz do modelo adaptativo da EN 15251, é superior a 50 %, em Bragança, inferior a 20 %, no Porto e em Lisboa e nula em Faro;**
- c) O consumo energético de aquecimento para garantir uma temperatura mínima de conforto de 18 °C é próximo de 40 kWh/m² em Bragança, inferior a 5 kWh/m² no Porto, e quase nulo em Lisboa e em Faro;**
- d) A percentagem de desconforto térmico de verão, à luz do modelo adaptativo da EN 15251, é nula nas 4 localizações.** Coloca-se, no entanto, algumas reservas relativamente à aplicação do modelo adaptativo da EN 15251 no estudo do conforto térmico de verão, pois a análise das frequências acumuladas revela valores de percentagem de horas de desconforto, para uma temperatura de 27 °C (limite de aceitabilidade), superiores a 50 % em Lisboa e Faro;
- e) O consumo energético de arrefecimento para garantir uma temperatura de conforto de 27 °C, é nulo, no Porto, inferior a 6 kWh/m², em Lisboa e Bragança, e próximo de 11 kWh/m² em Faro;**
- f) É possível ter conforto térmico de inverno sem aquecimento do ar ambiente, em Lisboa e Faro. No Porto, o valor da energia de aquecimento ambiente necessário à obtenção do conforto térmico é inferior a 5 kWh/m², e em Bragança próximo de 40 kWh/m²;**
- g) É possível ter conforto térmico de verão sem arrefecimento do ar ambiente no Porto. Em Lisboa e Bragança, o valor da energia de arrefecimento ambiente necessário à obtenção do conforto térmico é inferior a 6 kWh/m², e em Faro próximo de 11kWh/m²;**

h) As conclusões sintetizadas nos pontos a) a g) têm como suporte o estudo do Apartamento-Tipo representativo do conjunto habitacional de Lordelo. Trata-se de um apartamento com um volume de ar por ocupante reduzido ($30 \text{ m}^3/\text{ocupante}$) e com ganhos internos elevados (Capítulo 4.5.6.2).

7) Foram desenvolvidos na Tese 2 indicadores de desempenho (o Indicador de Desconforto Térmico de inverno e o Indicador de Desconforto Térmico de verão), que tendo como base de análise os valores horários da temperatura do ar interior, avaliam o desconforto térmico de inverno e de verão em edifícios de habitação social;

8) As recomendações que resultaram do estudo de avaliação da influência do isolamento das paredes e da ventilação noturna no conforto e na energia, desenvolvido no Capítulo 6, são as seguintes:

a) Em edifícios de habitação social, onde as práticas de aquecimento ambiente são nulas ou diminutas, a aplicação de isolamento térmico na envolvente opaca exterior traduz-se numa redução da percentagem de horas desconforto térmico que não excede 10 % da duração da estação de aquecimento no Porto, em Lisboa e em Faro. Em regime térmico de verão, a aplicação de isolamento térmico nas paredes exteriores, traduz-se num aumento do desconforto térmico em Lisboa e em Faro. Preconiza-se, desta forma, o isolamento das paredes exteriores de edifícios de habitação social em Bragança, e dispensa-se a sua aplicação no Porto, em Faro e Lisboa;

b) A aplicação de isolamento térmico pelo interior da fachada opaca, em edifícios de habitação social, traduz-se comparativamente à solução sem isolamento térmico, numa redução do desconforto térmico de inverno, e num aumento do desconforto térmico de verão, nas 4 localizações estudadas (Porto, Lisboa, Bragança e Faro). O investimento que resulta em isolar pelo interior deve ser devidamente ponderado para cada local, dado que muito embora este se traduza numa melhoria do desempenho térmico de inverno, produz um decréscimo considerável no desempenho térmico de verão;

c) O efeito da ventilação noturna na redução do desconforto térmico de verão é evidente em Lisboa e Faro. O valor-limite da taxa de renovação de ar a partir do qual a redução do desconforto térmico de verão não é significativa é de 4 h^{-1} .

7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O contributo do estudo desenvolvido na Tese pode ser ampliado em futuros trabalhos de investigação que venham a ser desenvolvidos no domínio do conforto térmico e da eficiência energética de edifícios de habitação social reabilitados. Destacam-se alguns dos aspetos que se consideram relevantes vir a desenvolver:

- O estudo desenvolvido na Tese não contabiliza questões de natureza económica. Neste contexto pode desenvolver-se uma análise técnico-económica das soluções de reabilitação testadas no estudo de otimização das soluções construtivas;
- Na Tese foram definidos um conjunto de recomendações de isolamento das paredes de fachada e da ventilação noturna, a aplicar na reabilitação de edifícios de habitação social. Em trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de estudos relativos a soluções não ensaiadas, como por

exemplo: a substituição de vidro duplo por vidro simples e a alteração do sistema de ventilação implementado;

- A medição experimental dos parâmetros de desempenho higrotérmico dos apartamentos instrumentados foi acompanhado do preenchimento de inquéritos, que permitiram registrar as rotinas diárias dos seus ocupantes. Num futuro trabalho de investigação que se venha a desenvolver, será possível correlacionar o valor dos parâmetros de desempenho higrotérmico medidos, com os resultados de preenchimento dos inquéritos, de modo a estudar a variabilidade do desempenho dos apartamentos com os hábitos de utilização dos seus ocupantes;
- O estudo do conforto térmico e da eficiência energética dos apartamentos instrumentados foi centrado no valor da temperatura do ar interior. Para além deste parâmetro higrotérmico foi medido o valor da humidade relativa do ar interior. O estudo deste parâmetro poderá proporcionar novos trabalhos de investigação na caracterização do desempenho higrotérmico dos apartamentos, face às exigências de conforto higrotérmico, durabilidade, economia, higiene e saúde. Um valor elevado da humidade relativa interior pode implicar a ocorrência humidades nas paredes e condensações superficiais, levando ao aparecimento de bolores e à deterioração dos materiais e elementos de construção;
- Foi efetuada a medição da concentração de dióxido de carbono (CO_2) do ar interior. Os valores obtidos no quarto ensaiado ultrapassaram o valor-limite de 2500 ppm, em 50% do seu período de ocupação, o que justifica um estudo de investigação detalhado, com recolha de outros parâmetros caracterizadores da Qualidade do Ar Interior;
- Foram desenvolvidos 2 indicadores de desempenho (o Indicador de Desconforto Térmico de inverno e o Indicador de Desconforto Térmico de verão) para avaliação do desconforto térmico em edifícios de habitação social. O aprofundamento dos estudos, com a sua aplicação a novos casos, poderá conduzir à definição de um valor-limite do indicador desenvolvido que permita definir uma fronteira entre conforto e desconforto térmico, bem como à definição de classes que possibilitem a avaliação do nível de desconforto existente.

BIBLIOGRAFIA

- ABRANTES, V., FREITAS, VASCO P. DE & SOUSA, M., 1999. *Reabilitação de Edifícios – Estudo do comportamento e análise técnico-económica das soluções utilizadas nas obras de construção e reabilitação*. Porto: IGAPHE – DGHN – FEUP.
- ABRANTES, V. & ABRANTES, N., 2013. *Vila d'Este: Reabilitação e Requalificação Arquitetónica em Vila Nova de Gaia*. Lisboa: Jornadas de Construção em Cimento 2013, Reabilitação – Casos de Referência.
- ADENE – AGÊNCIA PARA A ENERGIA, 2009. NT-SCE-02 - Metodologia para auditorias periódicas de QAI em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE. *Nota Técnica da ADENE*.
- AFONSO, M., 2004. *A Intervenção na Habitação Social, O caso do Bairro das Alagoas, Santa Maria da Feira*. Santa Maria da Feira: IGAPHE e Instituto de Solidariedade e Segurança Social.
- ALMEIDA, R., 2011. Avaliação do Desempenho Higrotérmico do Parque Escolar Reabilitado, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- APA – AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE, 2009. *Qualidade do Ar Interior – Um Guia Técnico*. Disponível em
- <URL: <http://www.apambiente.pt/serviços/LaboratorioReferencia/Documents>> (Consulta em Agosto de 2013).
- ARAÚJO, M., ALMEIDA, M. & BRAGANÇA, L., 2013. Analysis of some Portuguese thermal regulation parameters. *Energy and Buildings*, 58 (2013), pp. 141-150.
- ARTMANN, N., HEINRICH M. & HEISELBERG, P., 2006. Potential for Passive Cooling of Buildings by Night Time Ventilation in Present and Future Climates in Europe. In: *Proceedings of the 23rd International PLEA Conference*, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2001. Ansi/Ashrae Standard 140-2001. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. *ASHRAE*, Atlanta, USA.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS, 2004. Ansi/Ashrae Standard 62.1-2004. Ventilation for acceptable indoor air quality. *ASHRAE*, Atlanta, USA.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 2005. *Fundamentals Handbook*. Atlanta, USA: ASHRAE.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 2010. Ansi/Ashrae Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE*, Atlanta, USA.
- BAKER, N. & STANDEVEN, M., 1996. Thermal comfort for free-running buildings. *Energy and Buildings*, 23 (1996), pp. 175-182.
- BANDEIRINHA, J., 2001. *O Processo SAAL e a Arquitetura no 25 de Abril de 1974*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- BAPTISTA COELHO, A., 2004. *20 Anos a promover a construção de habitação social 1984-2004*. Lisboa: Instituto Nacional da Habitação.

- BARATA, F., 1998. As formas da casa na forma da cidade. In: *Encontros da Associação dos Arquitetos Portugueses – Habitação, Construir Cidade com Habitação*, Associação dos Arquitetos Portugueses, Lisboa.
- BOERSTRA A., 2006. The adaptive thermal comfort criterion in the new EPBD IEQ standard. In: *Proceedings of NCEUB Windsor conference 2006, “Comfort and Energy Use in Buildings. Getting them Right”*, Windsor, UK, 27-30 April 2006.
- BRAGER, G. & DE DEAR, R., 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27 (1), pp. 83-96.
- CANHA PIEDADE, A., RODRIGUES, A.M., & BRAGA, A.M., 2009. *Térmica de Edifícios*. Alfragide: Edições Orion.
- CARTA DE LISBOA, 1995. *Carta de Lisboa sobre a Reabilitação Urbana Integrada, Texto aprovado no 1.º Congresso Luso-Brasileiro de Reabilitação Urbana*. Lisboa: IGESPAR.
- CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2001. EN 13829:2001 – Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method . *CEN*, Brussels, Belgium.
- CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2005. prEN 15251:2005 – Criteria for the Indoor Environment including thermal, indoor air quality, light and noise. *CEN*, Brussels, Belgium.
- CEN - COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2007. EN 15251:2007 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. *CEN*, Brussels, Belgium.
- CIBSE – THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS, 2006. *Guide A: Environmental Design*. Norwich, England: 2006.
- COIMBRA, J., 2013. Como Construir e Utilizar de Forma Sustentável Habitação Cooperativa em Portugal a Custos Controlados, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, UM – Universidade do Minho.
- COIMBRA, J. & ALMEIDA, M., 2013. Challenges and benefits of building sustainable cooperative housing. *Building and Environment*, 62 (2013), pp. 9-17.
- COMETSYSTEM, 2013. *Cometsystem Loggers*. COMET SYSTEM, s.r.o.. Disponível em <URL: <http://www.cometsystem.cz> > (Consulta em Agosto de 2013).
- CORREIA FERNANDES, M., 2002. Conjunto Luso-Clima. In: *Jornal dos Arquitetos, A Questão do Alojamento 2, n.º 205*, Lisboa.
- CRAWLEY, D., LAWRIE, L., PEDERSEN, C., LIESEN, R., FISHER, D., STRAND, R., TAYLOR, R., WINKELMANN, F., BUHL, W., HUANG, Y. & ERDEM, A., 1999. EnergyPlus: A New-Generation Building Energy Simulation Program. In: *Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century*, Maui, Hawaii, 11-15 April 1999.
- CRAWLEY, D., LAWRIE, L., PEDERSEN, C. & WINKELMANN, F., 2000. EnergyPlus: Energy Simulation Program. *ASHRAE Journal*, 42, pp 49-56.
- CRAWLEY, D. B., HAND, J. W., KUMMERT, M. & GRIFFITH, B. T., 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), pp. 661-673.

- CUNNINGHAM, M., 1992. Effective Penetration Depth and Effective Resistance in Moisture Transfer. *Building and Environment*, 27 (3), pp. 379-386.
- CURADO, A., FREITAS, VASCO P. DE & RAMOS, N., 2012. Simulação do Comportamento Higrotérmico em Regime Dinâmico de uma Fração de Habitação de um Bairro Reabilitado. In: *Proceedings do 4.º Congresso Nacional Construção 2012*, Coimbra, Portugal, 18-20 Dezembro 2012.
- CURADO, A., FREITAS, VASCO P. DE & RAMOS, N., 2013. Variability Assessment of Summer Comfort Conditions in Social Housing Using *In Situ* Measurements. In: *Proceedings of the 2nd CESBP – Central European Symposium on Building Physics*, Vienna, Austria, 9-11 September 2013.
- DE DEAR, R., BRAGER, G. & COOPER, D., 1997. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. ASHRAE - RP-884 – Final Report, *ASHRAE*, Atlanta, USA.
- DE FREITAS, V.P., 1985. Quantificação do Coeficiente Volumétrico das Necessidades de Aquecimento – B em Função das Características da Envolvente, Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- DE FREITAS, V.P., 2009. Projeto de Reabilitação do Bairro de Lordelo do Ouro 2007-2009. *Prof. Eng. Vasco Peixoto de Freitas, Lda.. Relatório HT 264PE3/09*, Porto, Portugal.
- DE FREITAS, V. P. (COORD.), 2012. *Manual de apoio ao projeto de reabilitação de edifícios antigos*. Porto: Ordem dos Engenheiros.
- DELGADO, J. M. P. Q., RAMOS, N. M. M., BARREIRA, E., FREITAS V. P. DE, 2010. A Critical Review of Hygrothermal Models Used in Porous Building Materials. *Journal of Porous Media*, 13(3), pp. 221-234.
- DESIGNBUILDER, 2011. *DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide*, DesignBuilder Software Ltd., U.K.
- DGGE – DIREÇÃO GERAL DE GEOLOGIA E ENERGIA, 2004. *Reabilitação Energética da Envolvente de Edifícios Residenciais*. Lisboa: DGGE/IP-3E.
- DGGE – DIREÇÃO GERAL DE GEOLOGIA E ENERGIA, 2011. *Eficiência energética – Estatísticas, Indicadores Energéticos*. Disponível em <URL: <http://www.dgge.pt>> (Consulta em Agosto de 2013).
- ENERGYPLUS, 2013. *EnergyPlus Engineering Reference*. Disponível em <URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm> (Consulta em 2013).
- EUROCONSTRUCT, 2005. *Investimento no setor da construção em Portugal*. Disponível em <URL: <http://www.euroconstruct.org>> (Consulta em Agosto de 2013).
- FANGER, P., 1970. *Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. Denmark: McGraw-Hill.
- FERNANDES, F., CANNATÀ, M., 2002. *Guia da Arquitetura Moderna, Porto, 1925-2002*. Porto: ASA Editores.
- FONSECA FERREIRA, A., 1988. Política(s) de Habitação em Portugal. In: *Sociedade e Território*, n.º 6, Lisboa.
- FONSECA FERREIRA, A., 1993. *Livro Branco sobre a Política de Habitação em Portugal*. Porto: Edições Afrontamento.

- FOUTAIN, M., BRAGER, G. & DE DEAR, R., 1996. Expectations of indoor climate control. *Energy and Buildings*, 24 (3), pp. 179-182.
- FROTA, A. B., SCHIFFER, S. R., 1987. *Manual do Conforto Térmico*. São Paulo: Studio Nobel.
- GAGLIANO, A., NOCERA, F., PATANIA, F. & CAPIZZI, G., 2013. A Case Study of Energy Retrofit in Social Housing Units. In: *Proceedings of The Mediterranean Green Energy Forum 2013, MGEF-13*, Fes, Morocco, 16-20 June 2013.
- GIVONI, B., 2009. *Indoor Temperature Reduction by Passive Cooling Systems*. Beersheba, Israel: Ben-Gurion University.
- GODINHO DE ALMEIDA, M., 1998. Planos Integrados ou Planos Marginais. In: *Encontros da Associação dos Arquitetos Portugueses – Habitação, Construir Cidade com Habitação*, Associação dos Arquitetos Portugueses, Lisboa.
- HAGENTOFT, C.-E., 2001. *Introduction to Buildings Physics*. Lund, Sweden: Studentlitteratur.
- HENRIQUES, F., 2011. *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Lisboa: FCT/UNL.
- HENS, H., 2011. Dwelling air-tightness in a 55 years old estate. In: *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics - NSB 2011*, 1 of 3, pp. 47 to 54.
- HONG, S., 2011. Changes in Space Heating Energy Consumption Following Energy Efficient Refurbishment in Low-Income Dwellings in England, A thesis submitted for the degree of Doctor in Philosophy, The Bartlett School of Graduate Studies – University College London.
- IHRU, I.P., 2008. *Contributos para o Plano Estratégico da Habitação 2008-2013*, Relatórios 1, 2 e 3. Lisboa: CET-ISCTE/IRIC/A. Mateus e Associados.
- INE, I.P., 2011. *Consumo de Energia no Setor Doméstico 2010*. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística.
- INE, I.P., 2012. *Estatísticas da Habitação e da Construção 2011*. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística.
- INE, I.P., 2013. *Caraterização da Habitação Social em Portugal 2012*. Lisboa: Instituto Nacional de Estatística.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom, and New York, United States: Cambridge University Press.
- ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1998. ISO 7726 - Ergonomics of the Thermal Environment, Instruments for measuring physical quantities. ISO, Genève, Switzerland.
- ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001. ISO 13781 – Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements – Internal Surface Temperature to Avoid Critical Surface Humidity and Interstitial Condensation – Calculation Methods. ISO, Genève, Switzerland.
- ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005. ISO 7730 - Ergonomics of the Thermal Environment, Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. ISO, Genève, Switzerland.

- KALAMEES, T., 2007. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, 42 (6), pp. 2369-2377.
- LFC – LABORATÓRIO DE FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES, 2013. *Estação Meteorológica da FEUP*. Laboratório de Física das Construções, FEUP. Disponível em <URL: <http://paginas.fe.up.pt/~lfc-scc/ensaio07.html> > (Consulta em Agosto de 2013).
- LIDDAMENT, M., 1996. *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. Conventry, England: AIVC.
- LIESEN, R.J. & PEDERSON, C.O., 1999. Modeling the energy effects of combined heat and mass transfer in building elements. Part 1, Theory. *ASHRAE Transactions* 105 (2), pp. 941-953.
- LNEC - LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, 1985. *Conservação de energia nos edifícios*. Lisboa: LNEC, Relatório 317/85-NCct.
- MATIAS, L., 2010. Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal, Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.
- MATIAS, L., GOMES, R., PINA DOS SANTOS, C., 2012. *Reabilitação Térmica de Edifícios. Casos de estudo: Habitação social e escola*. Lisboa: Jornadas LNEC, engenharia para a sociedade, investigação e inovação, cidades e desenvolvimento.
- MCCARTNEY, K. & NICOL, F., 2002. Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 34 (6), pp 623-635.
- MELO, A.P., WESTPHAL F. S. & MATOS, M., 2009. *Apostila do Curso Básico do Programa EnergyPlus*. Florianópolis, Brasil: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações Universidade Federal de Santa Catarina.
- MENDES, N., WESTPHAL F.S., LAMBERTS R. & CUNHA NETO J.A.B., 2005. Uso de Instrumentos Computacionais para Análise do Desempenho Térmico e Energético em Edificações no Brasil. *Ambiente Construído*, V.5, Nº.4, pp. 47-68.
- NICOL, F. & MCCARTNEY, K., 2000. *Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs) Project. Final Report*. Joule III Project (Contract JOE3-CT97-0066).
- NICOL, F. & PAGLIANO L., 2007. Allowing for thermal comfort in free running buildings in the new standard prEN 15251. In: *Proceedings of 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century*, Crete island, Greece, September 2007.
- NICOL, F. & HUMPHREYS, M., 2010. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN 15251. *Building and Environment*, 45 (1), pp. 11-17.
- NP – NORMA PORTUGUESA, 2002. NP 1037-1, 2002 - Ventilação e evacuação de produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Parte I: Edifícios de Habitação. Ventilação natural. *IPQ*, Caparica, Portugal.
- NP – NORMA PORTUGUESA, 2010. NP EN 1991-1-4, 2010 - Eurocódigo 1: Ações em Estruturas, Parte 1-4: Ações gerais – Ações do vento. *IPQ*, Caparica, Portugal.
- OLESEN, B., 2004. International standards for the indoor environment. *Indoor Air*, 14 (s7), pp 18-26.
- OLESEN, B. W. & BRAGER, G. S., 2004. A Better Way to Predict Comfort. *ASHRAE Journal*, August 2004, pp 20-26.

- ONSET, 2013. *Hobo Data Loggers*. Onset Computer Corporation. Disponível em <URL: <http://www.onsetcomp.com> > (Consulta em Agosto de 2013).
- PERSAX, 2007. *Persianas Persax S.A., Lâminas de Alumínio Minicur 43*. Alicante, Espanha: Persax.
- PERSILY, A.K., 1996. Relationship Between Indoor Air Quality and Carbon Dioxide. In: *Proceedings of the 7th International Conference in Indoor Air Quality and Climate – Indoor Air '96*. Nagoya, Japão 21-26 de Julho de 1996.
- PIMENTA, M. (COORD.), 2001. *Estudo Socioeconómico de Habitação Social*. Porto: Câmara Municipal do Porto, Pelouro de Habitação e Ação Social.
- PINA DOS SANTOS, C., MATIAS, L., 2006. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. Informação Técnica Edifícios ITE 50*. Lisboa: LNEC.
- PINA DOS SANTOS, C., 2012. *Reabilitação dos Edifícios para Promoção do Conforto e da Eficiência Energética*. Lisboa: Net Zero – Energy Buildings Conference.
- PINTO, A., 2000. Sistemas de Climatização e Ventilação Mecânica. In: *Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos*, LNEC, Lisboa, Portugal.
- PINTO, A., 2006. *Ventilação Mecânica de Edifícios de Habitação*. Lisboa: LNEC, Relatório 01/06-NCI.
- PINTO, M., 2008. Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PINTO, M., VIEGAS, J. & DE FREITAS, V. P., 2011. Air permeability measurements of dwellings and building components in Portugal. *Building and Environment*, 46(12), pp. 2480-2489.
- PORDATA, 2013. *Consumo de Energia Final e Energia Elétrica pelo Setor Doméstico (%)*. Disponível em <URL: [http://www.pordata.pt/Europa/Consumo+de+energia+final+e+de+energia+electrica+pelo+sector+domestico+\(percentagem\)-1734](http://www.pordata.pt/Europa/Consumo+de+energia+final+e+de+energia+electrica+pelo+sector+domestico+(percentagem)-1734) > (Consulta em Dezembro de 2013).
- PRIEMUS, H., 1997. *Growth and Stagnation in Social Housing: What is “Social” in the Social Rented Sector?*. Delft, Holland: Housing Studies, Vol. 12, N.º 4.
- RAMOS, N.M.M., DELGADO, J.M.P.Q., BARREIRA, E. & FREITAS, V.P., 2009. Propriedades Higrotérmicas utilizadas em Simulação Numérica. In: *Atas do 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios (PATORREB)*, Vol. I, pp. 429 e 430.
- RAMOS, N., DE FREITAS, V.P., PEREIRA, P., CURADO, A. & MACHADO, A., 2013. Application of Blower Door Measurements in the Evaluation of Workmanship and Users Influence in Airtightness. In: *Proceedings of the 34th AIVC International Conference*, Athens, 25-26 September 2013.
- RAMOS, N., CURADO, A. & PEREIRA, P., 2014. Variability of Building Airtightness and Ventilation Due to User Actions on Envelope and Systems. In: *Proceedings of the 10th Nordic Symposium on Building Physics - NSB 2014* (submitted).
- RCCTE, 2006. Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios. *Diário da República*, I Série - A, Decreto-Lei nº 80/2006, Abril, Lisboa, 2006.
- REH, 2013. Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação. *Diário da República*, I Série - A, Decreto-Lei nº 118/2013, Agosto, Lisboa, 2013.

- RETSCREEN INTERNATIONAL, 2001-2005. *Ground-water heat pump project analysis chapter*. Canada: Minister of Natural Resources.
- RSECE, 2006. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização nos Edifícios. *Diário da República*, I Série - A, Decreto-Lei nº 79/2006, Abril, Lisboa, 2006.
- RODRIGUES, M.F., 2008. Estado de Conservação de Edifícios de Habitação a Custos Controlados, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, UA – Universidade de Aveiro.
- RODRIGUES, M., VICENTE, R. & CARDOSO, J., 2011. Energy Efficiency of Social Housing Buildings – A Portuguese Case Study. *Gazi University Journal of Science*, 24(2), pp.309-316.
- RODE, C. & GRAU, K., 2003. Whole building hygrothermal simulation model. *ASHRAE Transactions* 109 (1), pp. 572-582.
- SAINT-GOBAIN GLASS, 2010. *Manual do Vidro*. Santa Iria de Azoia: Saint-Gobain Glass.
- SANTAMOURIS, M., 2005. *Natural Ventilation in the Urban Environment, Assessment and Design*. UK: Editors Francis Allard and Cristian Ghiaus.
- SANTAMOURIS, M, SFAKIANAKI, A. & PAVLOU, K., 2010. On the Efficiency of night Ventilation, Techniques Applied to Residential Buildings. *Energy and Buildings*, 42 (2010), pp. 1309-1313.
- SCE, 2006. Sistema de Certificação Energética. *Diário da República*, I Série - A, Decreto-Lei nº 78/2006, Abril, Lisboa, 2006.
- SHAVIV E., YEZIORO A. & CAPELUTO, I., 2001. Thermal Mass and Night Ventilation as Passive Cooling Design Strategy. *Renewable Energy*, 24 (3-4), Nov. 2001, pp. 445-452.
- SHRRP, 2013. Energy Efficiency Retrofits in Social Housing: *A review of Policy and Practice in Toronto, Ontario. Social Housing Renovation and Retrofit Program*. Canada: Faculty of Environmental Design, University of Calgary.
- SILVA, M.G., 2006. Folhas de Cálculo para Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD. In: *Proceedings of Climamed Congress*, Lyon, França, 20-21 de Novembro de 2006.
- SINNOTT, D. & DYER, M. 2012. Air-tightness field data for dwellings in Ireland. *Building and Environment*, 51, pp. 269-275.
- SUÁREZ, R. & FERNÁNDEZ-AGUERA, J., 2011. Retrofitting of Energy Habitability in Social Housing: A Case Study in a Mediterranean Climate. *Buildings* 2011, 1, pp 4-15.
- TEIXEIRA, M., 1996. *Habitação Popular na cidade oitocentista, as ilhas do Porto (1988)*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, Textos Universitários de Ciências Sociais e Humanas.
- TEOTÓNIO PEREIRA, N., 1983. As Casas Económicas, 1947-1969. In: *Jornal dos Arquitetos* n.º 16, 17 e 18, Março/Abril, Lisboa.
- TEOTÓNIO PEREIRA, N., 1994. Pátios e Vilas de Lisboa, 1870-1930: a promoção privada de alojamento operário, Análise Social. In: *Revista do Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa*, n.º 127, 4.ª série, Vol. XXIX, Lisboa.
- TOPPING K. & PARKER P., 2011. Evaluating Occupant Comfort in Social Housing Following Building Envelope Upgrades. In: *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics - NSB 2011*, 3 of 3, pp. 1085 to 1092.

- TURNER S., 2008. ASHRAE's Thermal Comfort Standard in America: Future steps away from energy intensive design. In: *Proceedings of Conference Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings, Windsor, UK, 27-29 July 2008.
- UNIÃO EUROPEIA, 2010. 2010/31/CE - Directive on the Energy Performance of Buildings. *E.U. Official Journal*, Junho de 2010.
- URBACT, 2010. *Energy Efficiency for Social Housing, Baseline Study*. Cash: Cities action for sustainable housing, 2010.
- VIEGAS, J.C., 1996. *Ventilação Natural de Edifícios de Habitação. Coleção Edifícios – Número 4, Série Conforto Ambiental*. Lisboa: LNEC.
- VIEGAS, J., 2000. Contribuição da Ventilação para a Qualidade do Ar Interior em Edifícios. In: *Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos*, LNEC, Lisboa, Portugal.
- WALLAUER, M. D., 2003. Utilização do Programa Energyplus para Simulação do Conforto Térmico em Edificações Populares em Quatro Capitais Brasileiras. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- WESTPHAL, F.S. & LAMBERTS, R., 2004. Simulação Térmica e Energética de Edificações a Partir de Dados Climáticos Simplificados: Validação Através do Método BESTEST. *Ambiente Construído*, V.4, Nº.3, pp. 37-79.
- WESTPHAL F. S., 2006. *Introdução ao EnergyPlus*. Florianópolis, Brasil: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações Universidade Federal de Santa Catarina.
- Yi, Y.K. & Malkawi, M., 2009. Thermal Efficiency of the Window Shade. In: *Proceedings of the 11th International IBPSA Conference - Building Simulation 2009*. Glasgow, Scotland, 27-30 July.

ANEXO I:
VERIFICAÇÃO DOS *DATA LOGGERS*
NA CÂMARA CLIMÁTICA DA FEUP

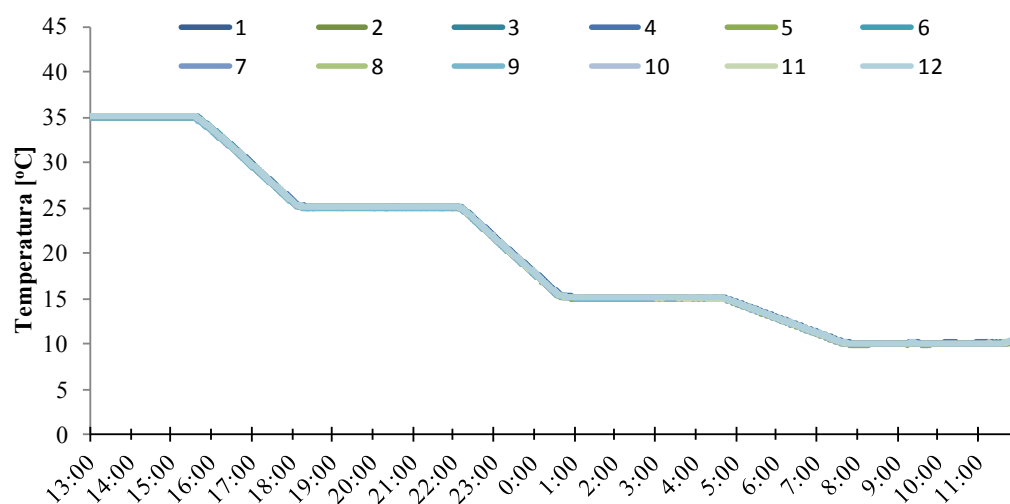
AI.1 MEDIÇÃO ANUAL DO APARTAMENTO-TIPO
AI.2 MEDIÇÃO DE “CURTA DURAÇÃO” E DE “MUITO CURTA DURAÇÃO”

AI.1 MEDIÇÃO ANUAL DO APARTAMENTO TIPO

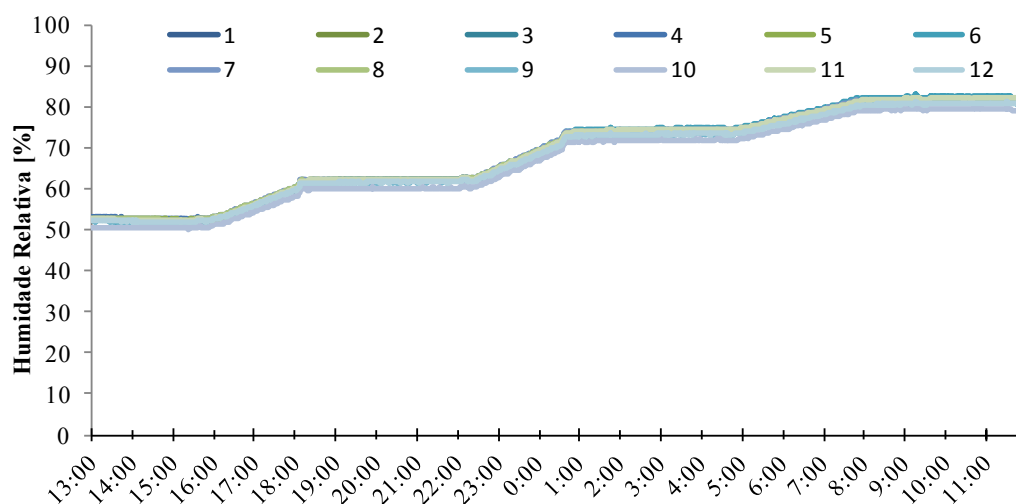
PROGRAMA DE VERIFICAÇÃO (MARÇO DE 2012)

Programa de Verificação		
Hora	Temperatura [°C]	Humidade Relativa [%]
13:00	35	50
16:00	35	50
18:30	25	60
22:30	25	60
1:00	15	72
5:00	15	72
8:00	10	80
12:00	10	80

TEMPERATURA

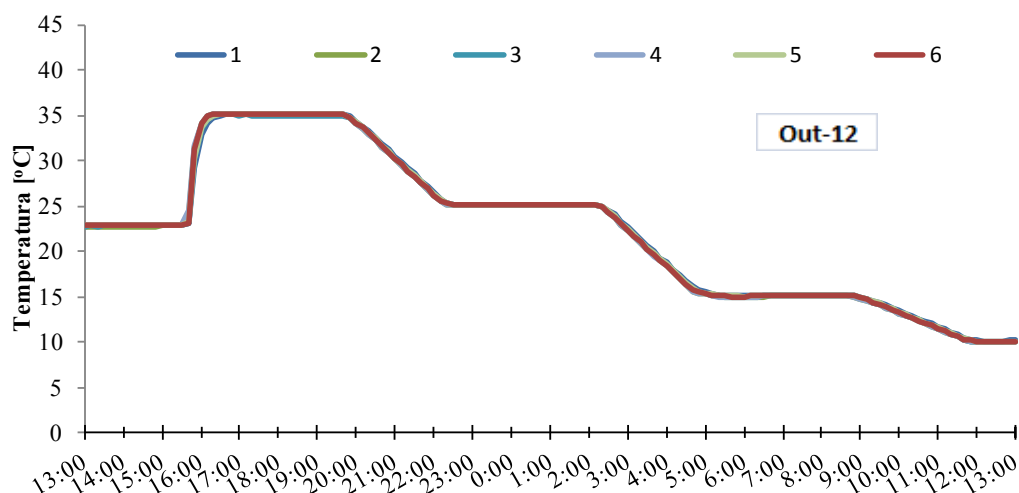
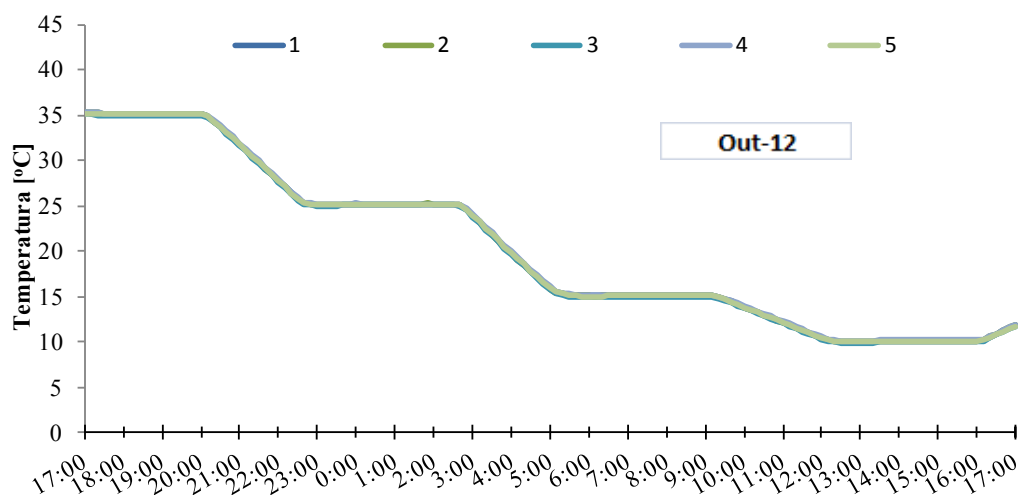
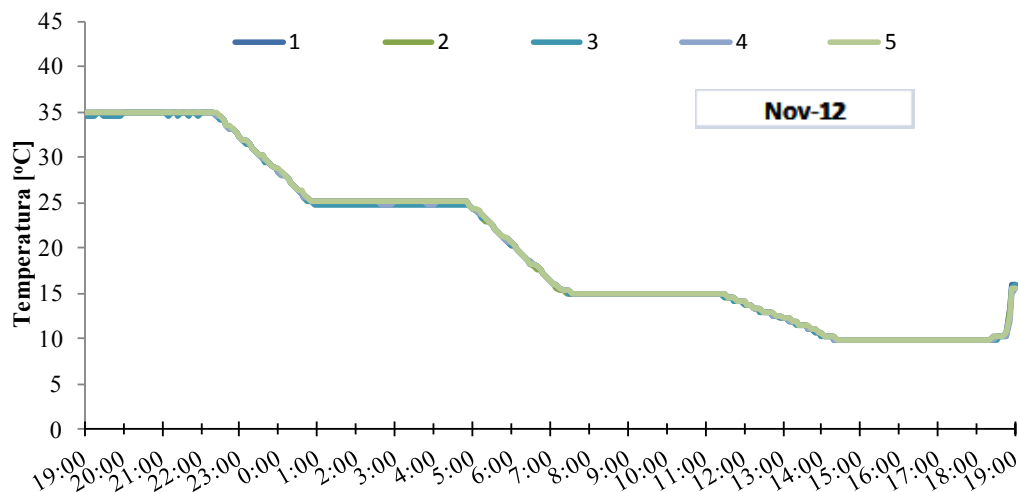


HUMIDADE RELATIVA



AI.1 MEDIÇÃO DE “CURTA DURAÇÃO” E DE “MUITO CURTA DURAÇÃO” DOS APARTAMENTOS

TEMPERATURA



ANEXO II: RESULTADOS DE MEDIÇÃO DO APARTAMENTO-TIPO

AII.1 TEMPERATURA MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA MENSAL EM Z1 E Z3

AII.2 FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DE TEMPERATURA EM Z1 E Z3

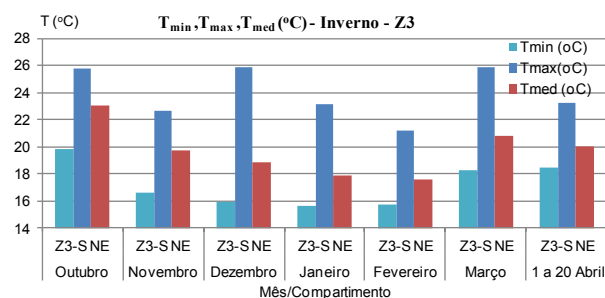
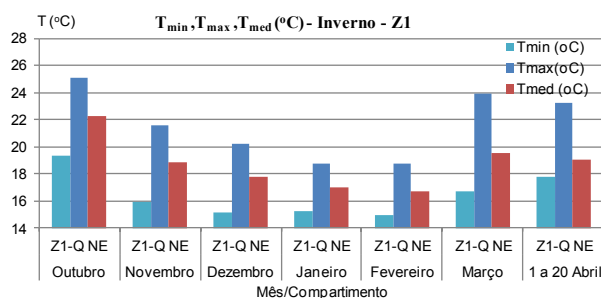
AII.3 FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DE HUMIDADE RELATIVA EM Z1 E Z3

AII.4 CONFORTO TÉRMICO À LUZ DA EN 15251 EM Z1 E Z3

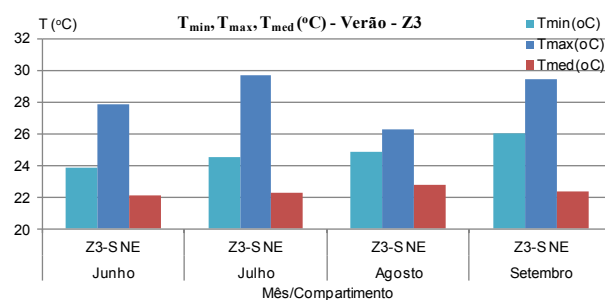
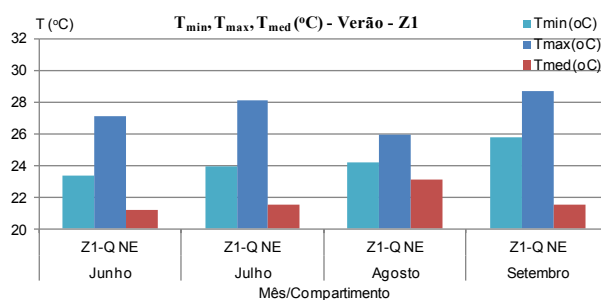
AII.5 CONFORTO TÉRMICO À LUZ DA ASHRAE 55 EM Z1 E Z3

AII.1 TEMPERATURA MÍNIMA, MÁXIMA E MÉDIA MENSAL EM Z1 E Z3

ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

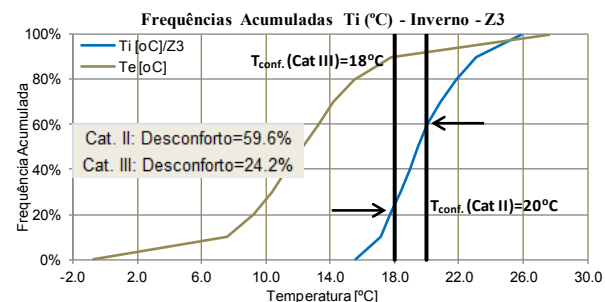
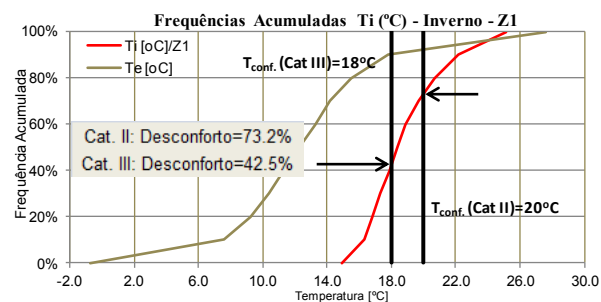


ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

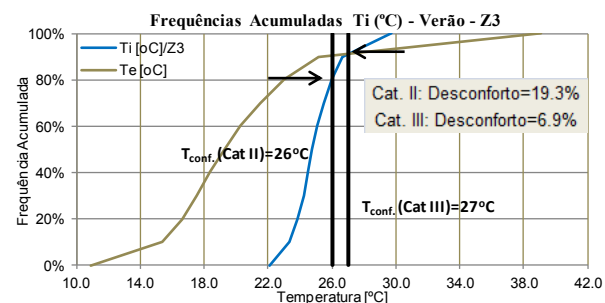
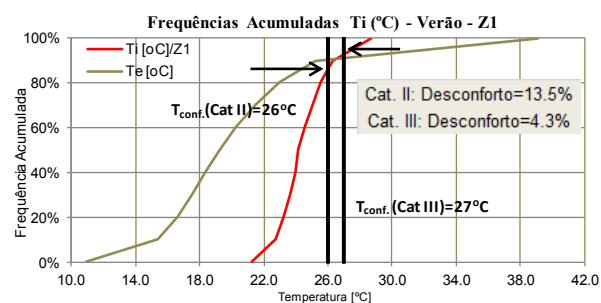


AII.2 FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DE TEMPERATURA EM Z1 E Z3

ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

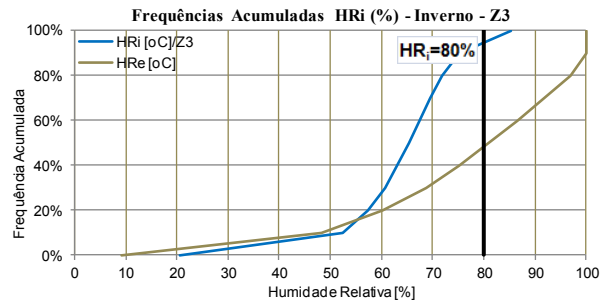
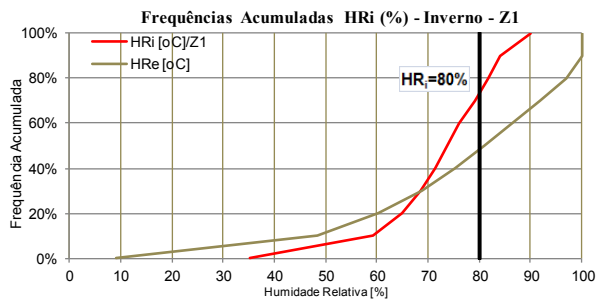


ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

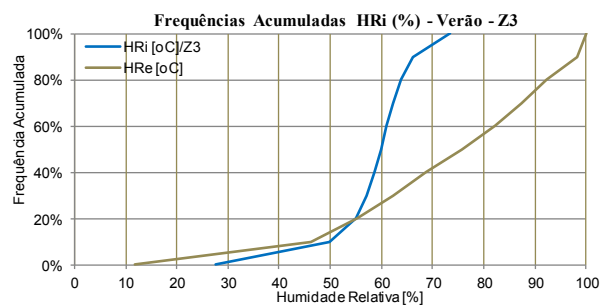
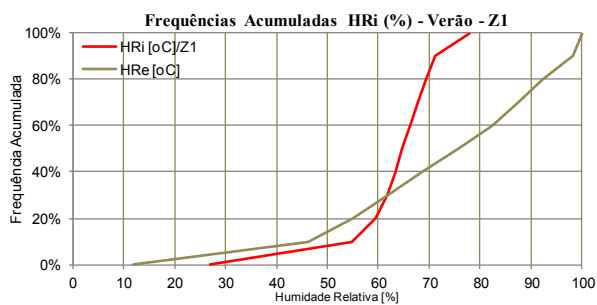


AII.3 FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DE HUMIDADE RELATIVA EM Z1 E Z3

ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

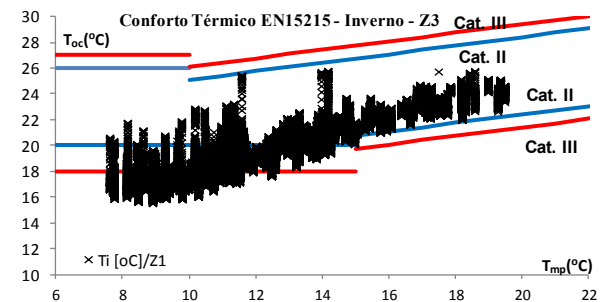
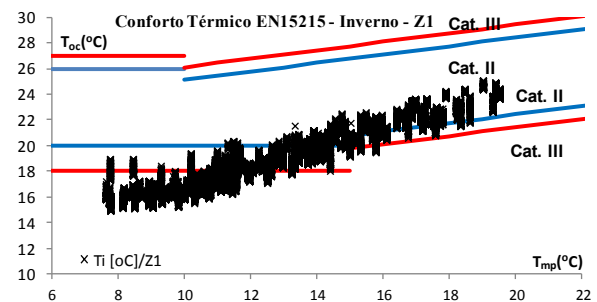


ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

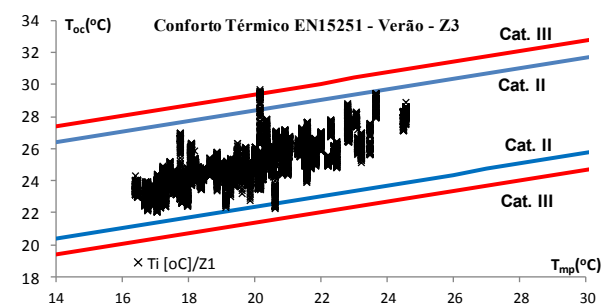
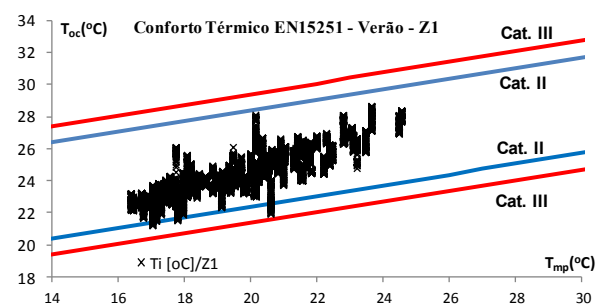


AII.4 CONFORTO TÉRMICO À LUZ DA EN 15251 EM Z1 E Z3

ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO

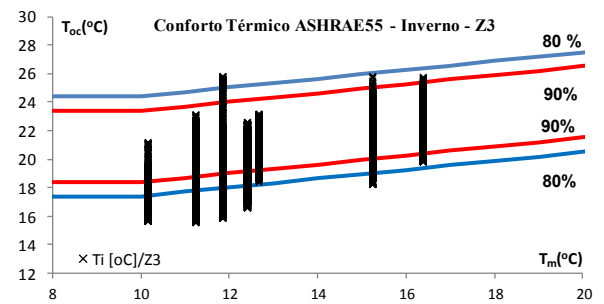
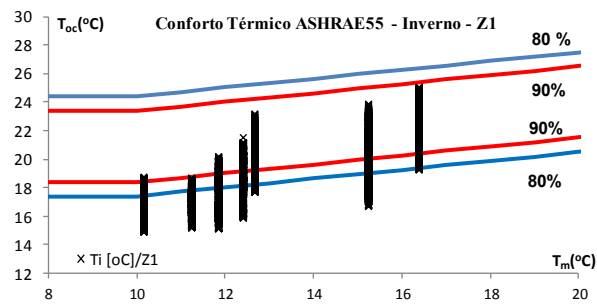


ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

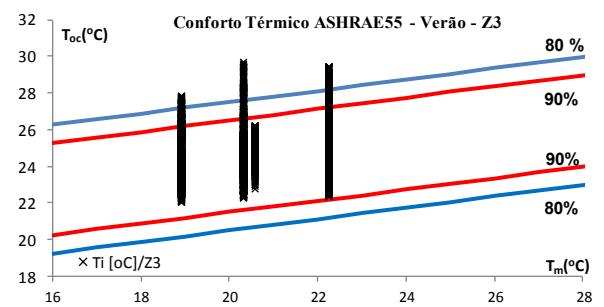
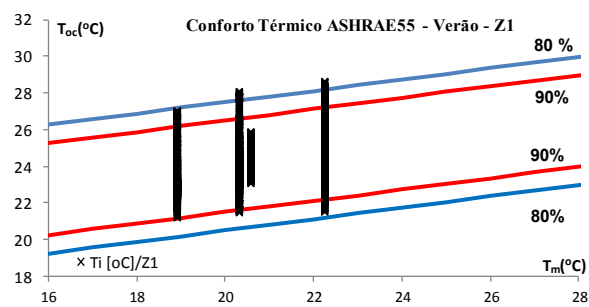


AII.5 CONFORTO TÉRMICO À LUZ DA ASHRAE 55 EM Z1 E Z3

ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO



ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO



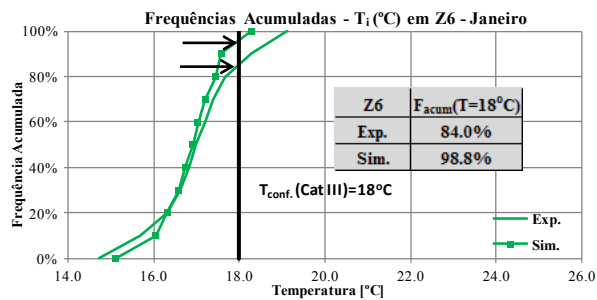
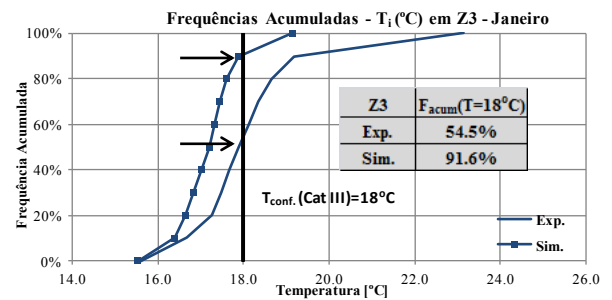
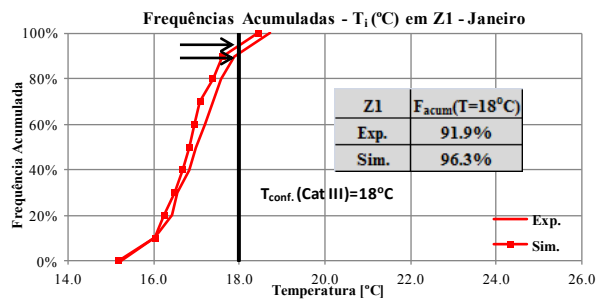
**ANEXO III:
ESTUDO DE FREQUÊNCIAS
ACUMULADAS DOS CENÁRIOS
EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO**

AIII.1 MESES DE JANEIRO E FEVEREIRO

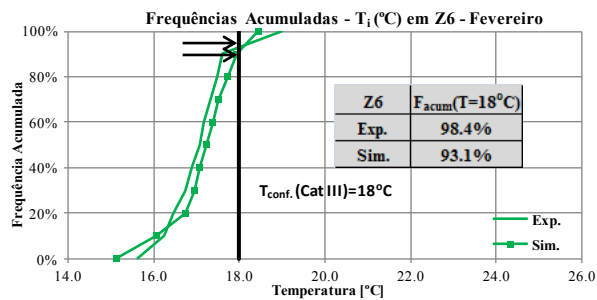
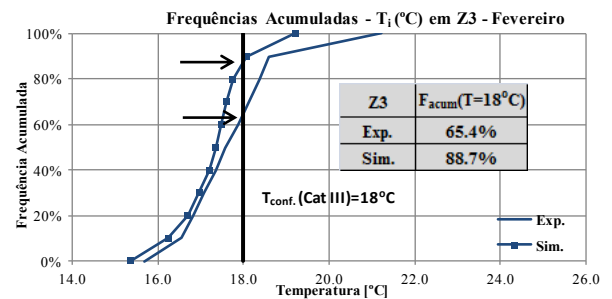
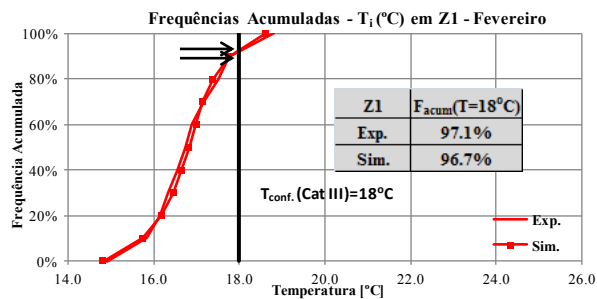
AIII.2 MESES DE JULHO E SETEMBRO

AIII.1 MESES DE JANEIRO E FEVEREIRO

CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – CENÁRIOS EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO - JANEIRO

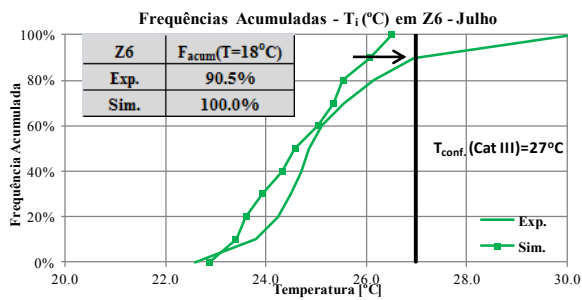
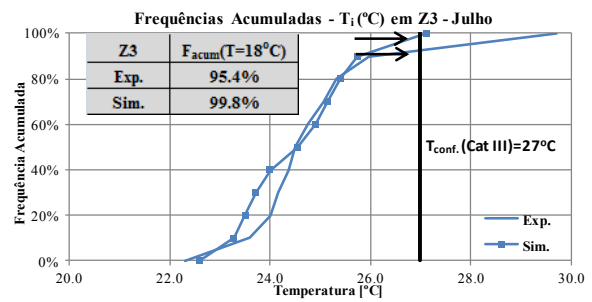
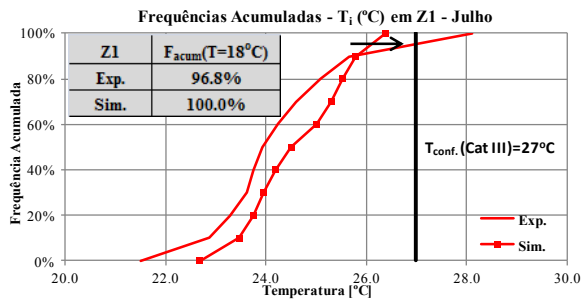


CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – CENÁRIOS EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO - FEVEREIRO

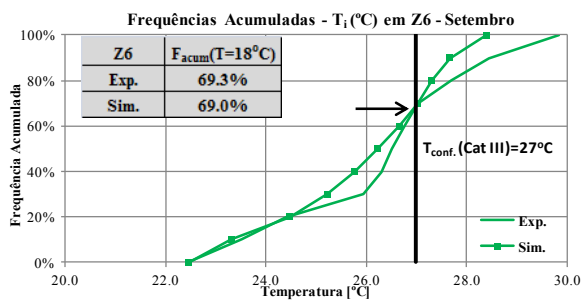
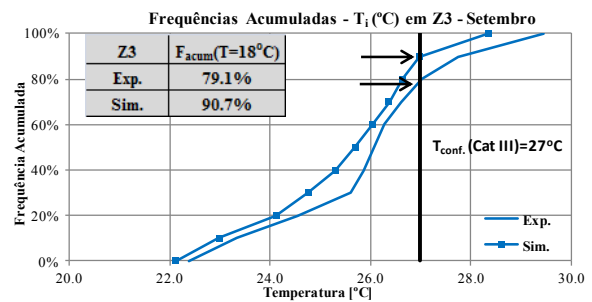
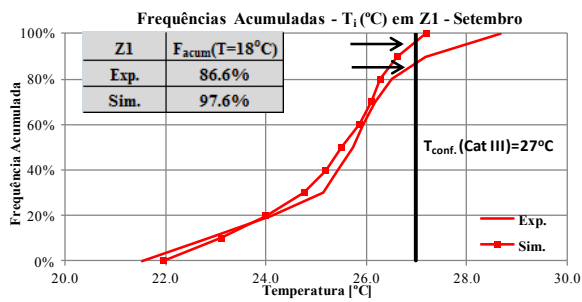


AIII.2 MESES DE JULHO E SETEMBRO

CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – CENÁRIOS EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO - JULHO



CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – CENÁRIOS EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO - SETEMBRO



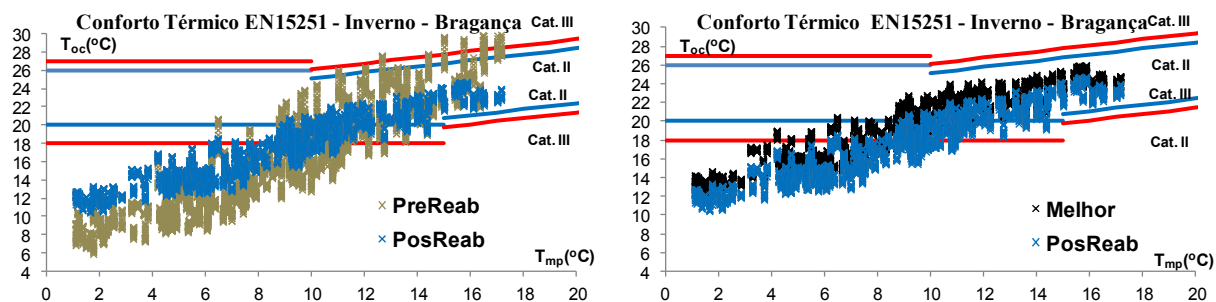
ANEXO IV:
AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO
E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
DO APARTAMENTO-TIPO

AIV.1 BRAGANÇA

AIV.2 FARO

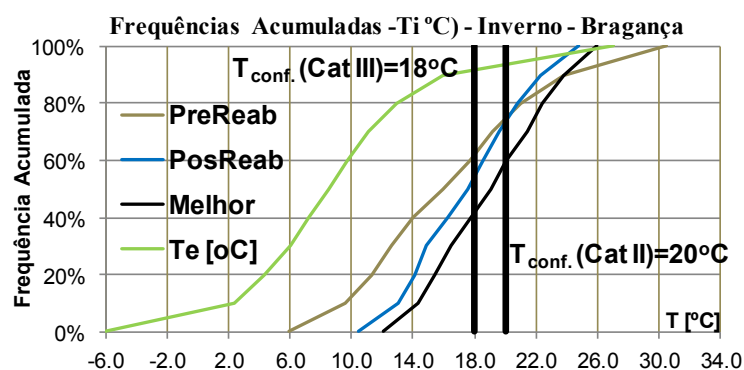
AIV.1 BRAGANÇA

CONFORTO TÉRMICO À LUZ DA EN15251 – INVERNO



Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	Desconforto (h)		%	
			Cat. III	Cat. II	Cat. III	Cat. II
8 m /5832h	PreReab	Z6 (Q-SW)	3633	4345	62.3	74.5
	PosReab		3207	4272	55.0	73.3
	Melhor		2380	3441	40.8	59.0

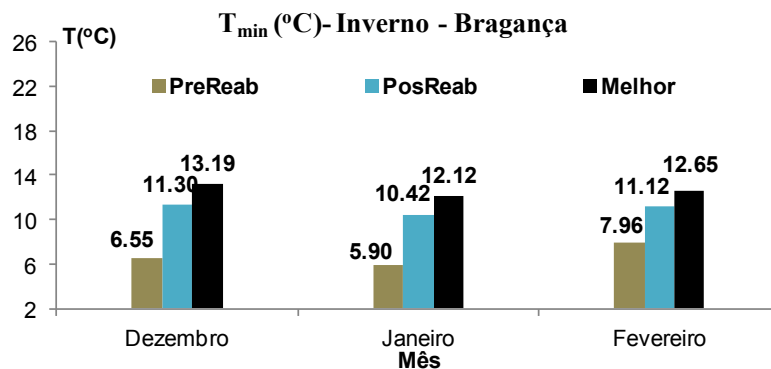
CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – INVERNO



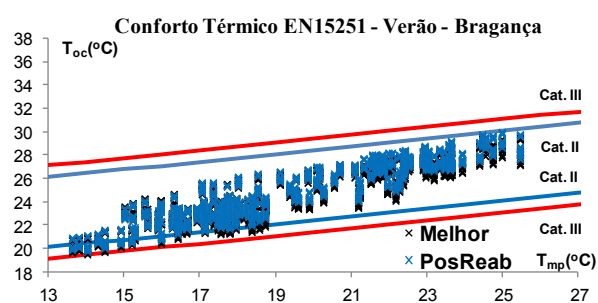
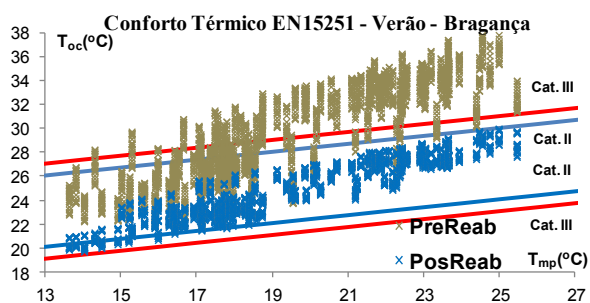
PERCENTIS DE TEMPERATURA – INVERNO

Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)
8 m / 5832h	PreReab	Z6 (Q-SW)	9.6	16.0
	PosReab		13.0	17.6
	Melhor		14.4	19.1

TEMPERATURA MÍNIMA MENSAL – INVERNO

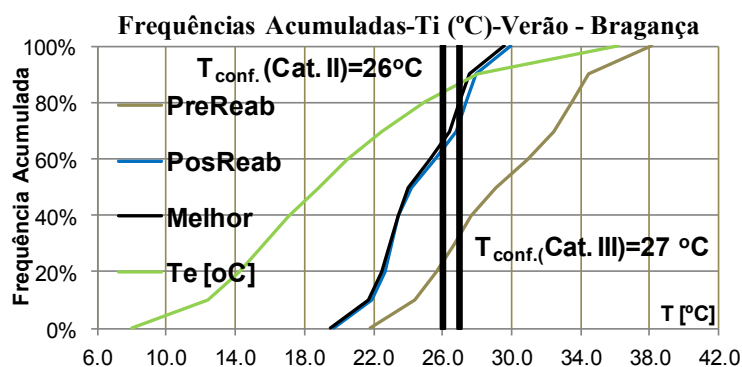


CONFORTO TÉRMICO À LUZ DA EN15251 – VERÃO



Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	Desconforto (h)	Desconforto (h)	%	%
			Cat. III	Cat. II	Cat. III	Cat. II
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	1478	1774	50.5	60.6
	PosReab		0	0	0.0	0.0
	Melhor		0	0	0.0	0.0

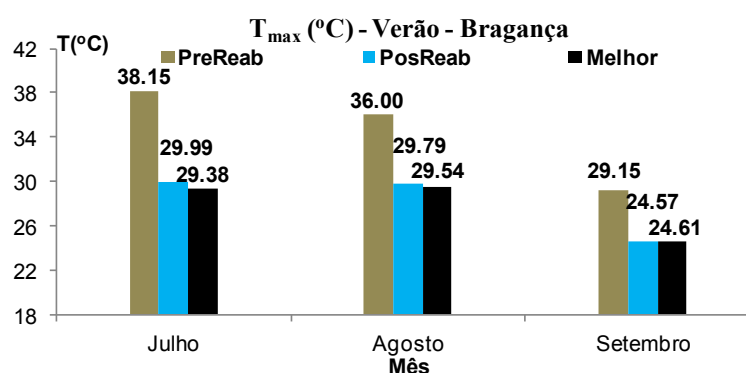
CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – VERÃO



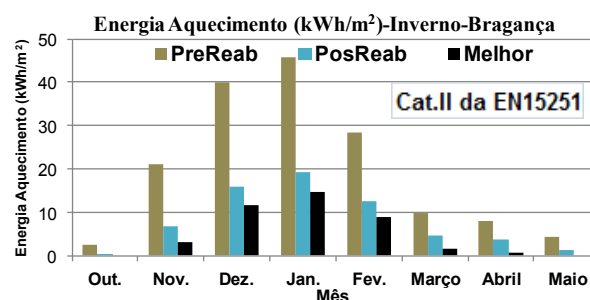
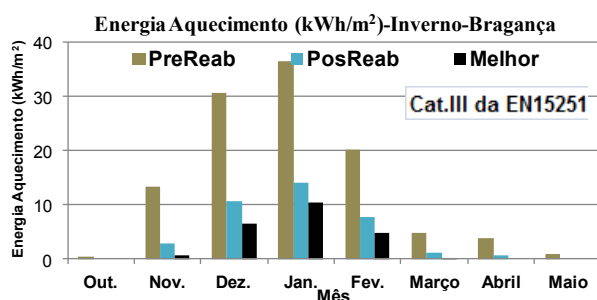
PERCENTIS E FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DE TEMPERATURA – VERÃO

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)	F_{acum} (T=26°C)	F_{acum} (T=27°C)
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	29.1	34.4	22.4%	32.9%
	PosReab		24.2	28.0	63.2%	73.2%
	Melhor		24.0	27.6	65.3%	80.0%

TEMPERATURA MÁXIMA MENSAL – VERÃO

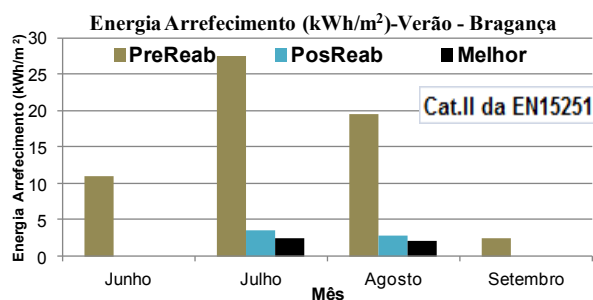
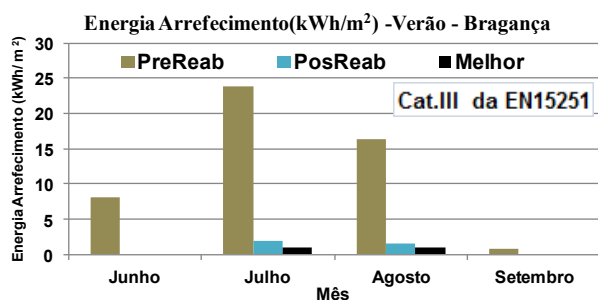


VARIAÇÃO MENSAL DA ENERGIA DE AQUECIMENTO – INVERNO



Cat.	Cenário	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Março	Abril	Maio	Total (kWh/m²)
III	PreReab	0.50	13.25	30.78	36.46	20.29	4.91	3.87	1.00	111.06
	PosReab	0.00	2.95	10.57	14.11	7.82	1.30	0.70	0.00	37.46
	Melhor	0.00	0.72	6.44	10.37	4.76	0.02	0.00	0.00	22.32
II	PreReab	2.62	21.11	39.87	45.65	28.27	9.85	8.10	4.20	159.67
	PosReab	0.00	6.79	15.85	19.38	12.51	4.52	3.79	1.23	64.06
	Melhor	0.00	3.25	11.58	14.78	8.81	1.63	0.73	0.00	40.77

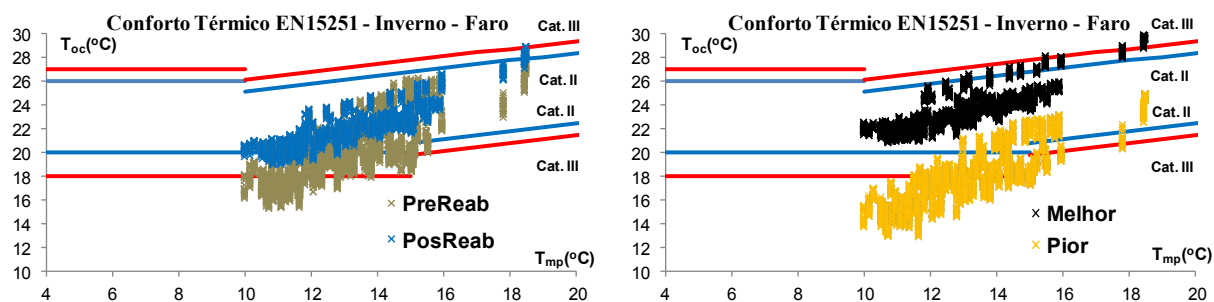
VARIAÇÃO MENSAL DA ENERGIA DE ARREFECIMENTO – VERÃO



Cat.	Cenário	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Total (kWh/m ²)
III	PreReab	8.16	23.75	16.31	0.88	49.11
	PosReab	0.00	1.89	1.46	0.00	3.35
	Melhor	0.00	0.92	0.93	0.00	1.85
II	PreReab	11.00	27.42	19.58	2.52	60.53
	PosReab	0.00	3.63	2.88	0.00	6.51
	Melhor	0.00	2.39	2.10	0.00	4.49

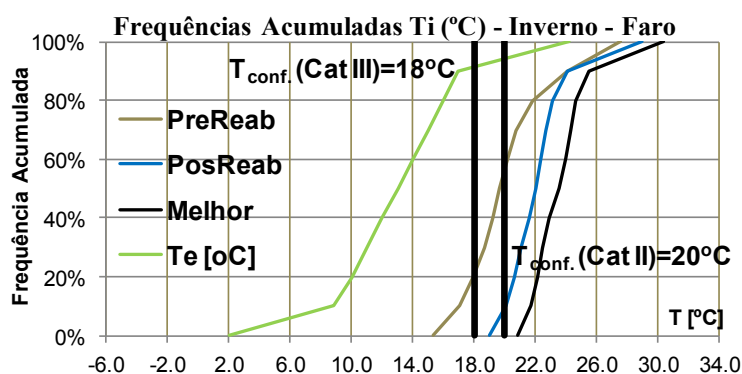
AIV.2 FARO

CONFORTO TÉRMICO À LUZ DA EN15251 – INVERNO



Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	Desconforto (h)		%	
			Cat. III	Cat. II	Cat. III	Cat. II
4.3 m / 3120h	PreReab	Z6 (Q-SW)	683	1805	21.9	57.9
	PosReab		0	239	0.0	7.7
	Melhor		0	0	0.0	0.0

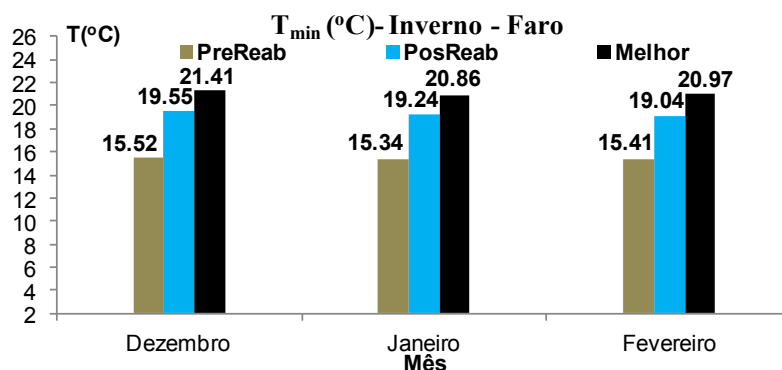
CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – INVERNO



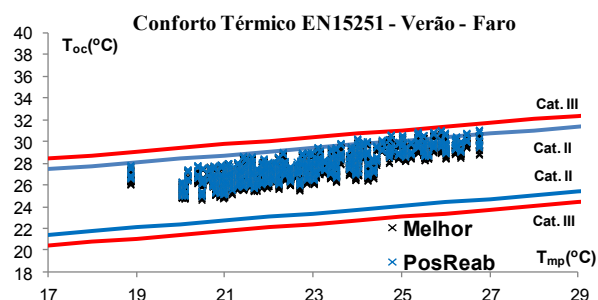
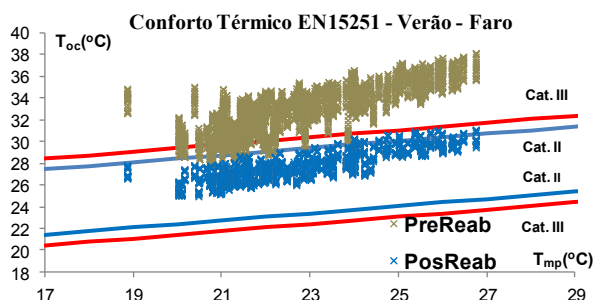
PERCENTIS DE TEMPERATURA – INVERNO

Estação Aquecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
4.3 m / 3120h	PreReab	Z6 (Q-SW)	17.1	19.7
	PosReab		20.1	22.0
	Melhor		21.7	23.5

TEMPERATURA MÍNIMA MENSAL – INVERNO

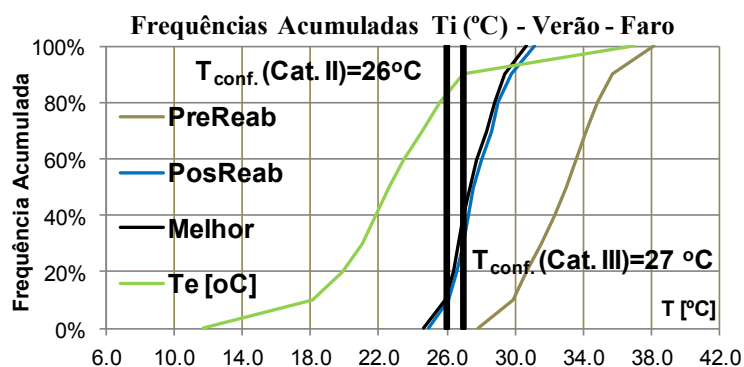


CONFORTO TÉRMICO À LUZ DA EN15251 – VERÃO



Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	Desconforto (h)		%	
			Cat. III	Cat. II	Cat. III	Cat. II
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	2636	2867	90.0	97.9
	PosReab		0	139	0.0	4.7
	Melhor		0	74	0.0	2.5

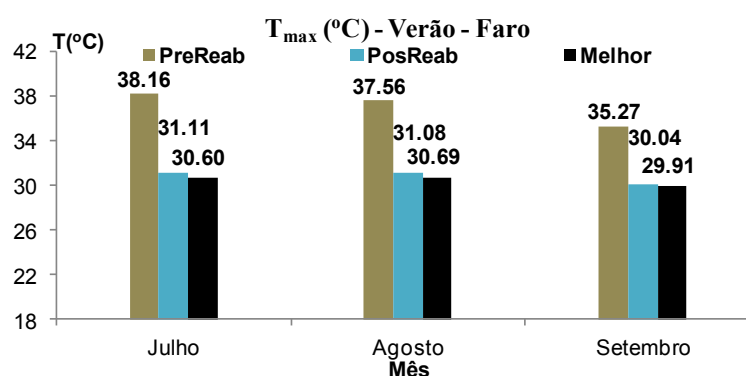
CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – VERÃO



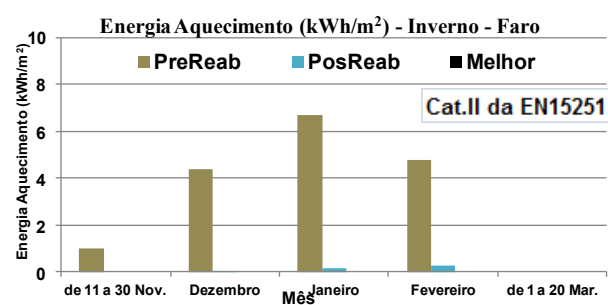
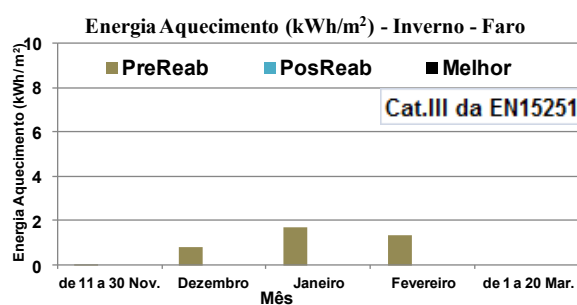
PERCENTIS E FREQUÊNCIAS ACUMULADAS DE TEMPERATURA – VERÃO

Estação Arrefecimento (M/h)	Cenário	Zona Térmica	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)	F_{acum} (T=26°C)	F_{acum} (T=27°C)
4.0 m / 2928 h	PreReab	Z6 (Q-SW)	33.0	35.7	0.0%	0.0%
	PosReab		27.6	29.7	7.7%	32.0%
	Melhor		27.3	29.4	12.4%	39.6%

TEMPERATURA MÁXIMA MENSAL – VERÃO

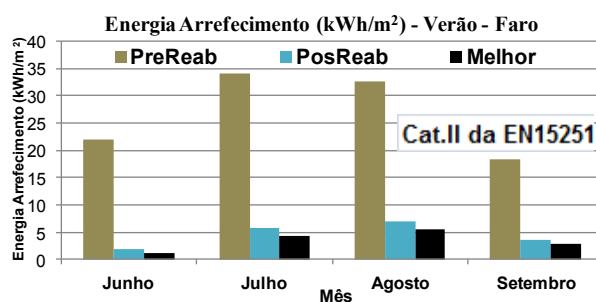
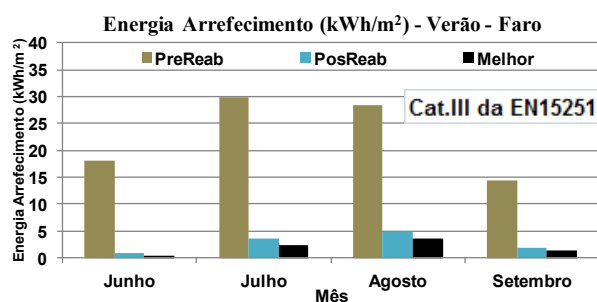


VARIAÇÃO MENSAL DA ENERGIA DE AQUECIMENTO – INVERNO



Cat.	Cenário	11 a 30 Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	1 a 20 Março	Total (kWh/m²)
III	PreReab	0.01	0.81	1.70	1.36	0.00	3.89
	PosReab	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Melhor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
II	PreReab	1.02	4.39	6.70	4.78	0.00	16.88
	PosReab	0.00	0.02	0.17	0.30	0.00	0.49
	Melhor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

VARIAÇÃO MENSAL DA ENERGIA DE ARREFECIMENTO – VERÃO



Cat.	Cenário	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Total (kWh/m ²)
III	PreReab	18.06	29.90	28.45	14.50	90.91
	PosReab	0.78	3.56	4.85	1.90	11.09
	Melhor	0.41	2.46	3.66	1.34	7.88
II	PreReab	21.95	34.14	32.61	18.36	107.06
	PosReab	1.87	5.68	6.93	3.67	18.15
	Melhor	1.23	4.34	5.59	2.78	13.93

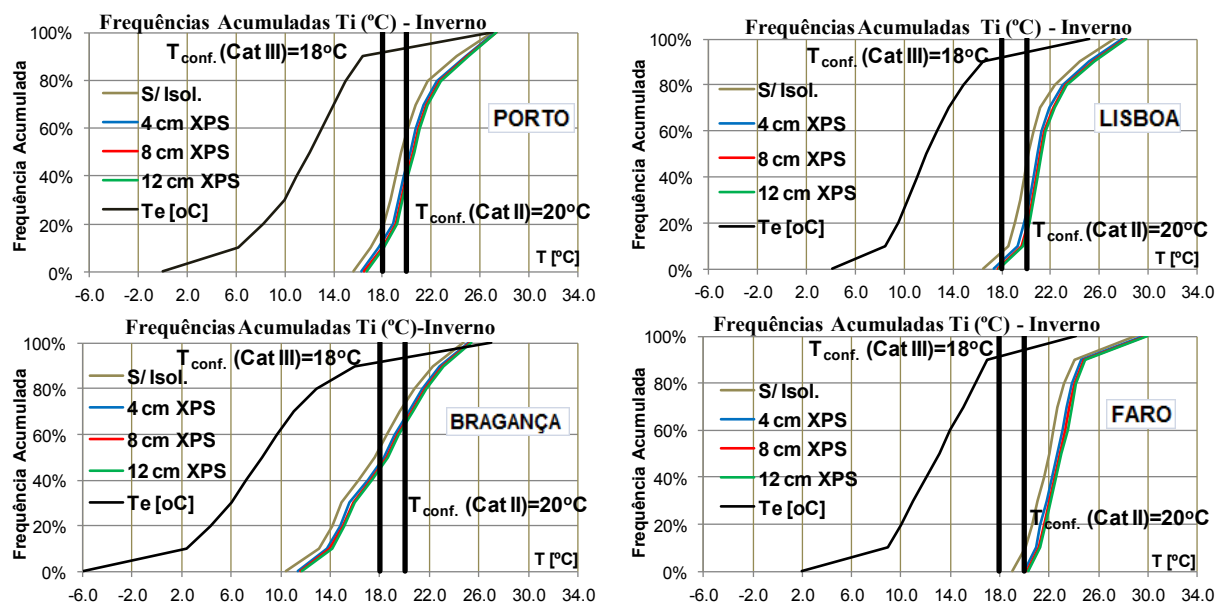
ANEXO V:
ESTUDO DE FREQUÊNCIAS ACUMULADAS
E DOS PERCENTIS DE TEMPERATURA
DAS SOLUÇÕES PARA AVALIAÇÃO
DA INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO
TÉRMICO DAS PAREDES
NO CONFORTO E NA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

AV.1 INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA FACHADA

AV.2 INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO PELO INTERIOR DA FACHADA

AV.1 INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA FACHADA

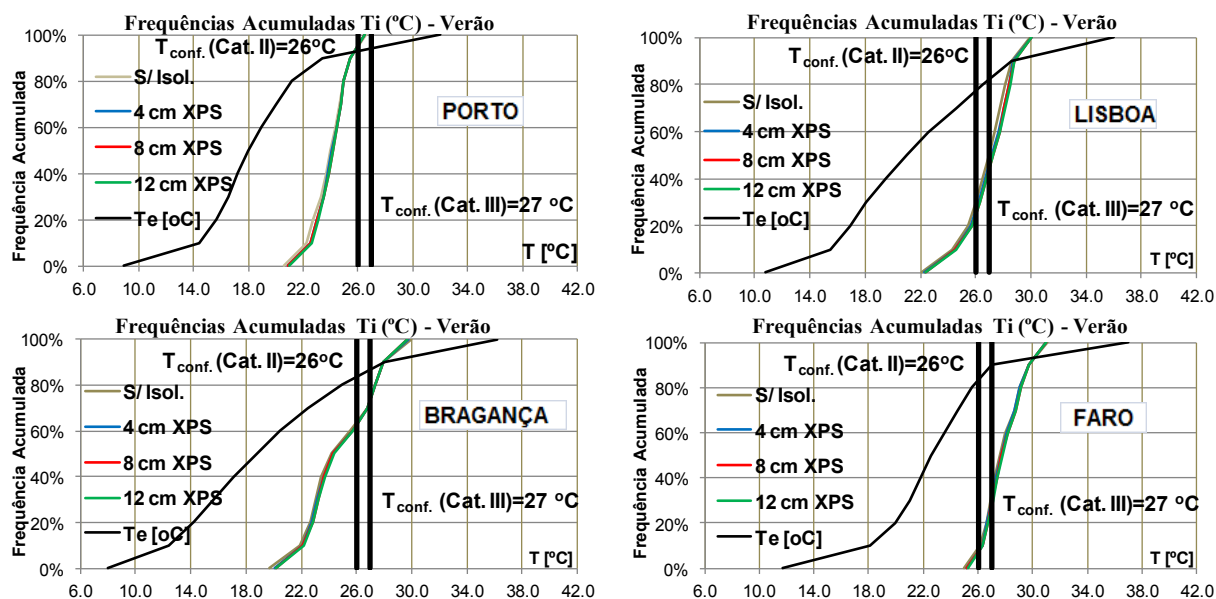
CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – INVERNO



PERCENTIS DE TEMPERATURA – INVERNO

Local	Estação Aquecimento (m/h)	Cenário	T_{10} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{50} ($^{\circ}\text{C}$)
Porto	6.7 m / 4848h	S/ Isol.	17.0	19.5
		4 cm XPS	17.7	20.3
		8 cm XPS	18.0	20.5
		12 cm XPS	18.1	20.6
Lisboa	5.3 m / 3888h	S/ Isol.	18.6	20.2
		4 cm XPS	19.3	20.9
		8 cm XPS	19.6	21.1
		12 cm XPS	19.7	21.2
Bragança	8.0 m / 5832h	S/ Isol.	13.0	17.6
		4 cm XPS	13.7	18.3
		8 cm XPS	14.0	18.5
		12 cm XPS	14.1	18.6
Faro	4.3 m / 3120h	S/ Isol.	20.1	22.0
		4 cm XPS	20.9	22.7
		8 cm XPS	21.1	22.9
		12 cm XPS	21.3	23.0

CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – VERÃO

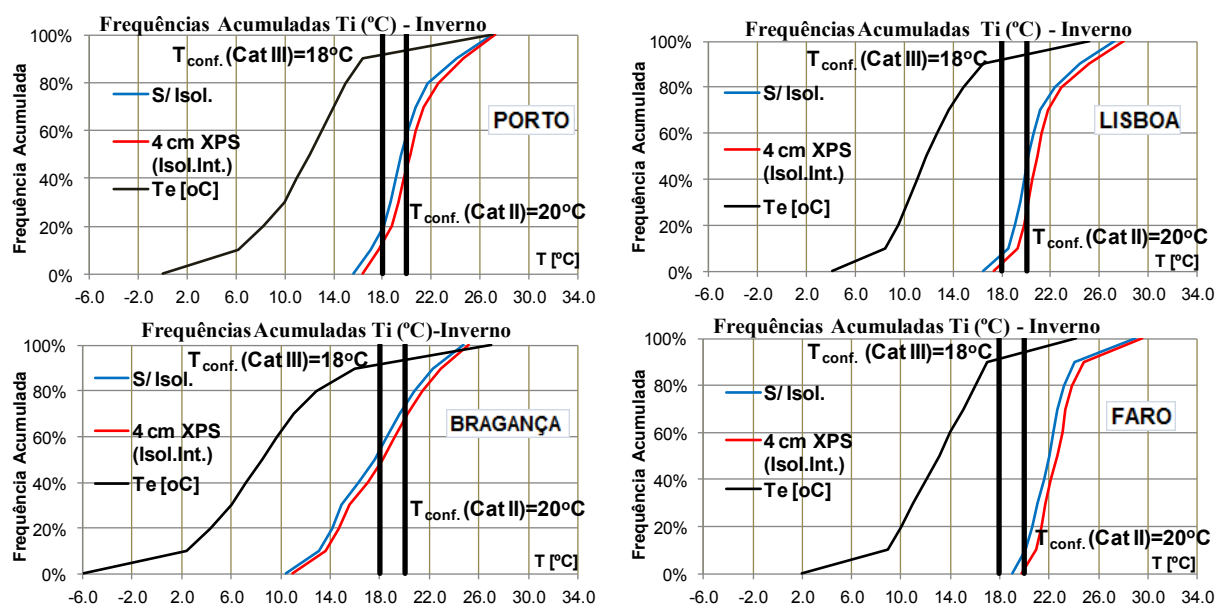


PERCENTIS DE TEMPERATURA – VERÃO

Local	Estação Arrefecimento (m/h)	Cenário	T_{50} (°C)	T_{90} (°C)
Porto	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	24.0	25.4
		4 cm XPS	24.1	25.4
		8 cm XPS	24.1	25.4
		12 cm XPS	24.2	25.5
Lisboa	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	27.0	28.6
		4 cm XPS	27.2	28.8
		8 cm XPS	27.3	28.8
		12 cm XPS	27.3	28.8
Bragança	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	24.2	28.0
		4 cm XPS	24.3	28.0
		8 cm XPS	24.3	27.9
		12 cm XPS	24.4	27.9
Faro	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	27.6	29.7
		4 cm XPS	27.7	29.7
		8 cm XPS	27.7	29.7
		12 cm XPS	27.8	29.7

AV.2 INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO PELO INTERIOR DA FACHADA

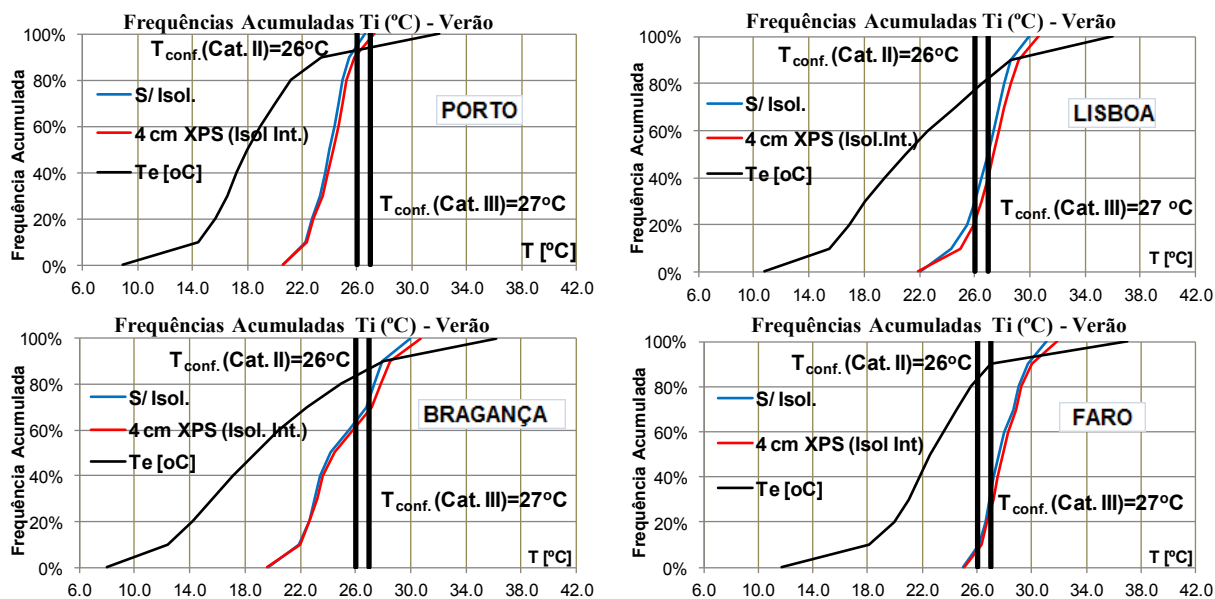
CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – INVERNO



PERCENTIS DE TEMPERATURA – INVERNO

Local	Estação Aquecimento (M/h)	Solução	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
Porto	6.7 m / 4848h	S/ Isol.	17.0	19.5
		4 cm XPS (Isol Int)	17.7	20.2
Lisboa	5.3 m / 3888h	S/ Isol.	18.6	20.2
		4 cm XPS (Isol Int)	19.3	20.9
Bragança	8.0 m / 5832h	S/ Isol.	13.0	17.6
		4 cm XPS (Isol Int)	13.6	18.2
Faro	4.3 m / 3120h	S/ Isol.	20.1	22.0
		4 cm XPS (Isol Int)	20.9	22.6

CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA DE TEMPERATURA – VERÃO



PERCENTIS DE TEMPERATURA – VERÃO

Local	Estação Arrefecimento (M/h)	Solução	T_{50} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{90} ($^{\circ}\text{C}$)
Porto	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	24.0	25.4
		4cm XPS (Isol. Int.)	24.2	25.8
Lisboa	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	27.0	28.6
		4cm XPS (Isol. Int.)	27.4	29.1
Bragança	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	24.2	28.0
		4cm XPS (Isol. Int.)	24.5	28.5
Faro	4.0 m / 2928 h	S/ Isol.	27.6	29.7
		4cm XPS (Isol. Int.)	27.9	30.1

ANEXO VI:
ESTUDO DA ENERGIA DE AQUECIMENTO E DE
ARREFECIMENTO DAS SOLUÇÕES
DE AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO
ISOLAMENTO TÉRMICO DAS PAREDES
E DA VENTILAÇÃO NOTURNA NO
CONFORTO E NA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA

AVI.1 INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA FACHADA

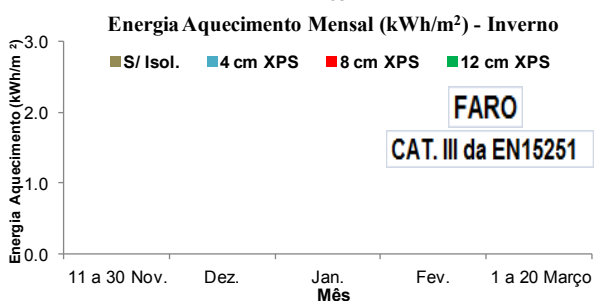
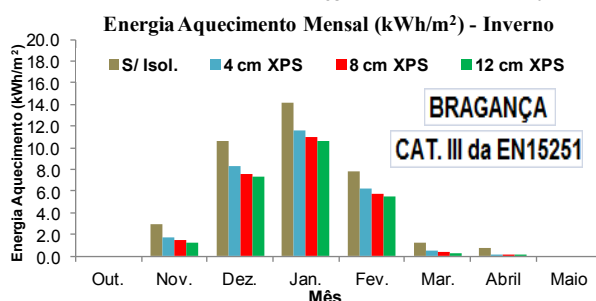
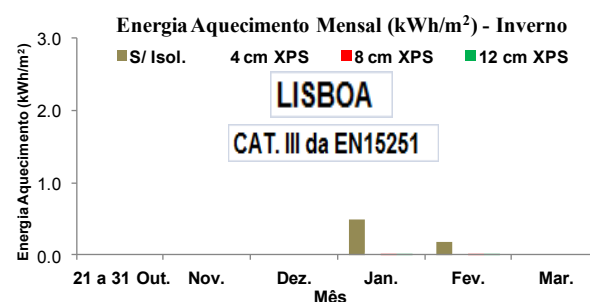
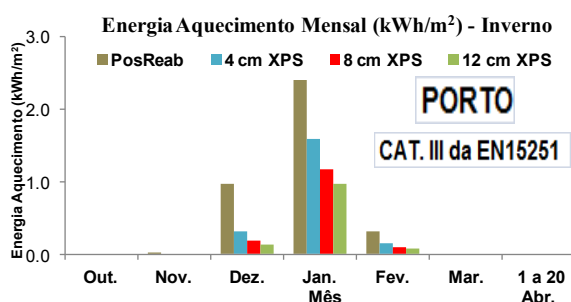
AVI.2 INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO PELO INTERIOR DA FACHADA

AVI.3 INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO NOTURNA

AVI.1 INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA FACHADA

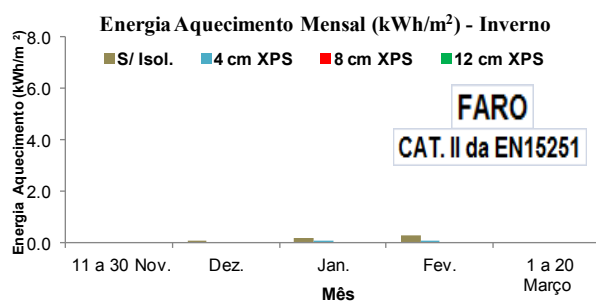
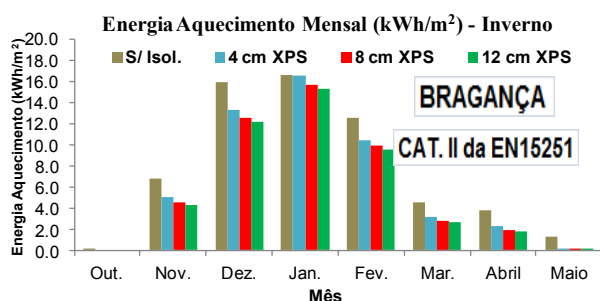
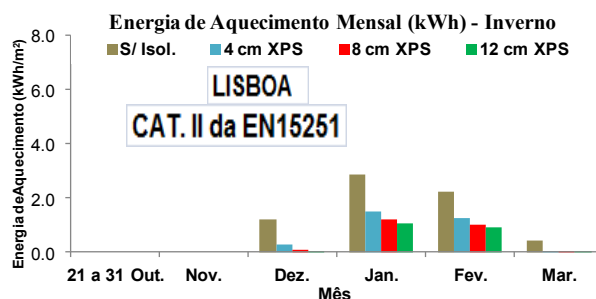
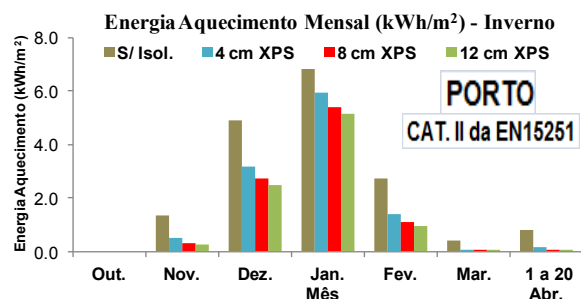
VALOR MENSAL DA ENERGIA DE AQUECIMENTO – CATEGORIA III

Loc.	Cenário	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Março	Abril	Maio	Total (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	0.00	0.02	0.97	2.88	0.31	0.00	0.00	0.00	4.17
	4 cm XPS	0.00	0.00	0.31	1.58	0.14	0.00	0.00	0.00	2.03
	8 cm XPS	0.00	0.00	0.18	1.16	0.10	0.00	0.00	0.00	1.44
	12 cm XPS	0.00	0.00	0.12	0.97	0.08	0.00	0.00	0.00	1.16
Lisboa	S/ Isol.	0.00	0.00	0.00	0.49	0.19	0.00	0.00	0.00	0.68
	4 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06
	8 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	12 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Bragança	S/ Isol.	0.00	2.95	10.57	14.11	7.82	1.30	0.70	0.00	37.46
	4 cm XPS	0.00	1.74	8.29	11.66	6.20	0.53	0.12	0.00	28.53
	8 cm XPS	0.00	1.43	7.62	10.95	5.72	0.35	0.04	0.00	26.11
	12 cm XPS	0.00	1.29	7.29	10.60	5.49	0.27	0.02	0.00	24.96
Faro	S/ Isol.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



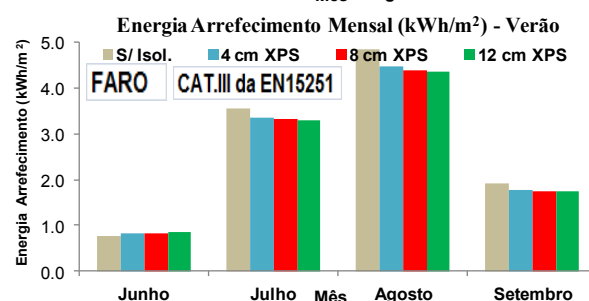
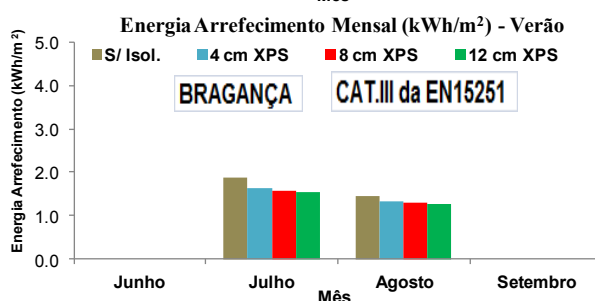
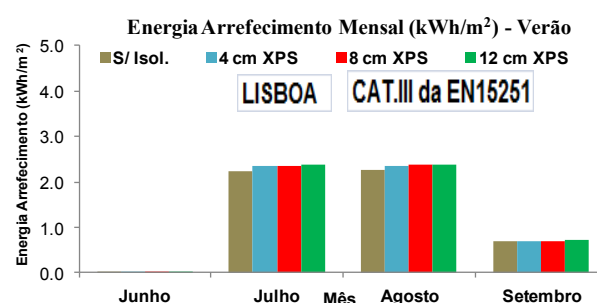
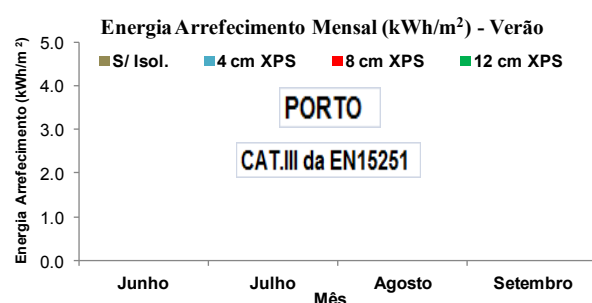
VALOR MENSAL DA ENERGIA DE AQUECIMENTO – CATEGORIA II

Loc.	Cenário	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Março	Abril	Maio	Total (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	0.00	1.34	4.89	7.62	2.71	0.42	0.78	0.00	17.76
	4 cm XPS	0.00	0.51	3.19	5.92	1.37	0.01	0.13	0.00	11.14
	8 cm XPS	0.00	0.31	2.70	5.39	1.06	0.00	0.04	0.00	9.51
	12 cm XPS	0.00	0.23	2.46	5.13	0.92	0.00	0.02	0.00	8.76
Lisboa	S/ Isol.	0.00	0.00	1.20	2.87	2.24	0.45	0.00	0.00	6.78
	4 cm XPS	0.00	0.00	0.28	1.51	1.28	0.02	0.00	0.00	3.10
	8 cm XPS	0.00	0.00	0.12	1.21	1.03	0.00	0.00	0.00	2.35
	12 cm XPS	0.00	0.00	0.06	1.07	0.90	0.00	0.00	0.00	2.04
Bragança	S/ Isol.	0.00	6.79	15.85	19.38	12.51	4.52	3.79	1.23	64.06
	4 cm XPS	0.00	5.08	13.22	16.45	10.44	3.20	2.30	0.12	50.81
	8 cm XPS	0.00	4.54	12.48	15.63	9.84	2.82	1.90	0.02	47.24
	12 cm XPS	0.00	4.27	12.13	15.24	9.56	2.63	1.72	0.00	45.55
Faro	S/ Isol.	0.00	0.00	0.02	0.17	0.30	0.00	0.00	0.00	0.49
	4 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



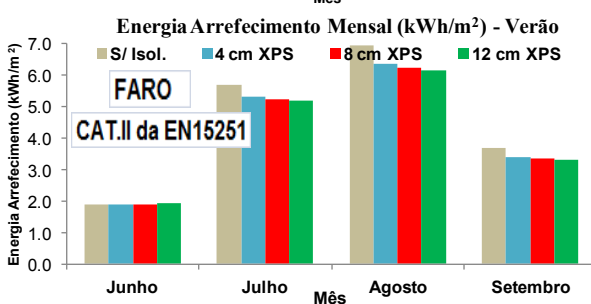
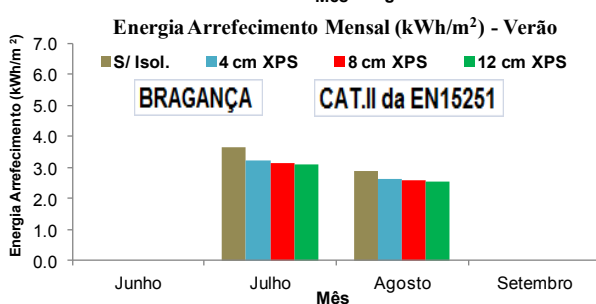
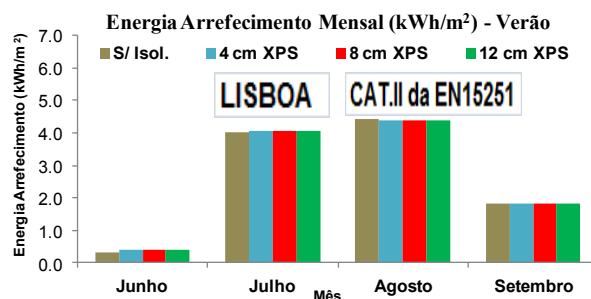
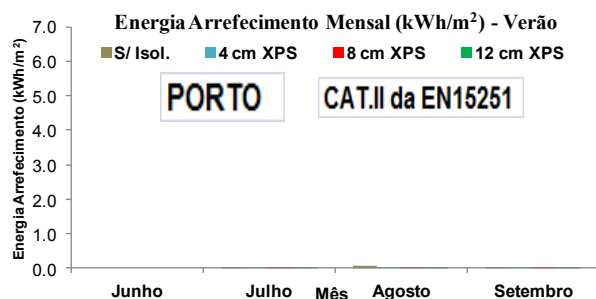
VALOR MENSAL DA ENERGIA DE ARREFECIMENTO – CATEGORIA III

Local	Cenário	Junho (kWh)	Julho (kWh)	Agosto (kWh)	Setembro (kWh)	Total (kWh)
Porto	S/ Isol.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12 cm XPS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lisboa	S/ Isol.	0.01	2.24	2.26	0.69	5.19
	4 cm XPS	0.02	2.34	2.35	0.69	5.40
	8 cm XPS	0.02	2.36	2.37	0.70	5.46
	12 cm XPS	0.03	2.37	2.39	0.71	5.50
Bragança	S/ Isol.	0.00	1.89	1.46	0.00	3.35
	4 cm XPS	0.00	1.63	1.32	0.00	2.95
	8 cm XPS	0.00	1.58	1.29	0.00	2.87
	12 cm XPS	0.00	1.55	1.28	0.00	2.83
Faro	S/ Isol.	0.78	3.56	4.85	1.90	11.09
	4 cm XPS	0.82	3.35	4.46	1.77	10.40
	8 cm XPS	0.84	3.31	4.38	1.75	10.28
	12 cm XPS	0.85	3.30	4.35	1.74	10.23



VALOR MENSAL DA ENERGIA DE ARREFECIMENTO – CATEGORIA II

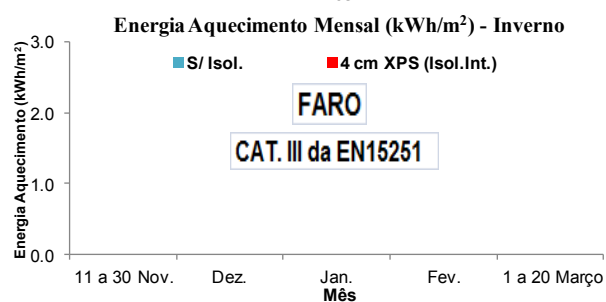
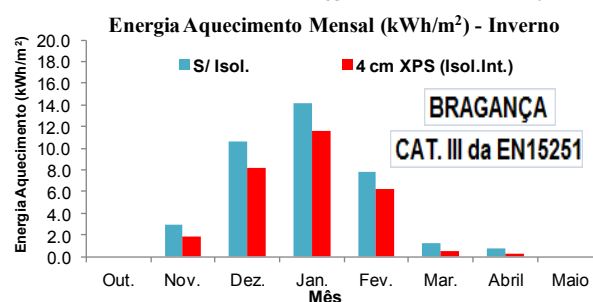
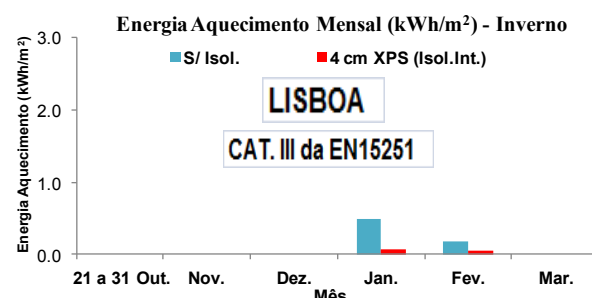
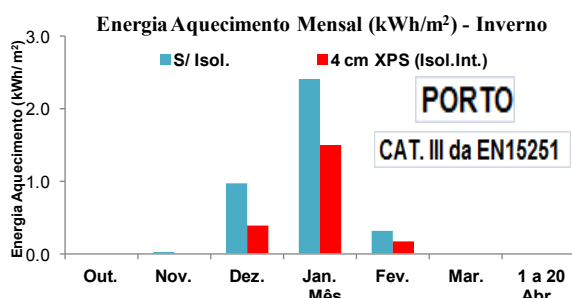
Local	Cenário	Junho (kWh)	Julho (kWh)	Agosto (kWh)	Setembro (kWh)	Total (kWh)
Porto	S/ Isol.	0.00	0.02	0.06	0.02	0.10
	4 cm XPS	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05
	8 cm XPS	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05
	12 cm XPS	0.00	0.01	0.04	0.01	0.05
Lisboa	S/ Isol.	0.33	4.03	4.42	1.84	10.62
	4 cm XPS	0.39	4.07	4.38	1.81	10.66
	8 cm XPS	0.41	4.07	4.37	1.83	10.68
	12 cm XPS	0.42	4.07	4.37	1.84	10.70
Bragança	S/ Isol.	0.00	3.63	2.88	0.00	6.51
	4 cm XPS	0.00	3.24	2.62	0.00	5.86
	8 cm XPS	0.00	3.15	2.57	0.00	5.71
	12 cm XPS	0.00	3.10	2.54	0.00	5.65
Faro	S/ Isol.	1.87	5.68	6.93	3.67	18.15
	4 cm XPS	1.89	5.31	6.35	3.39	16.94
	8 cm XPS	1.90	5.23	6.22	3.33	16.68
	12 cm XPS	1.91	5.19	6.16	3.30	16.56



AVI.2 INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO PELO INTERIOR DA FACHADA

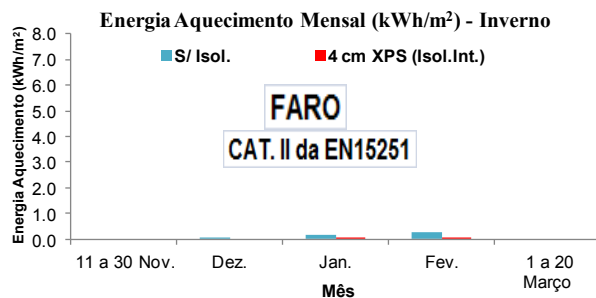
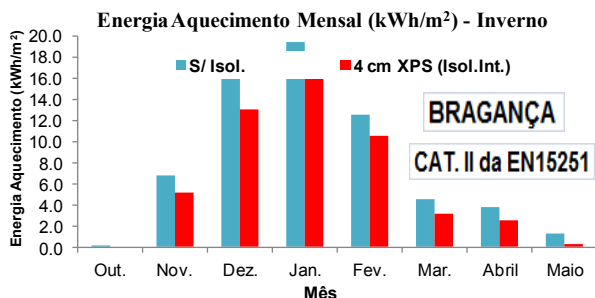
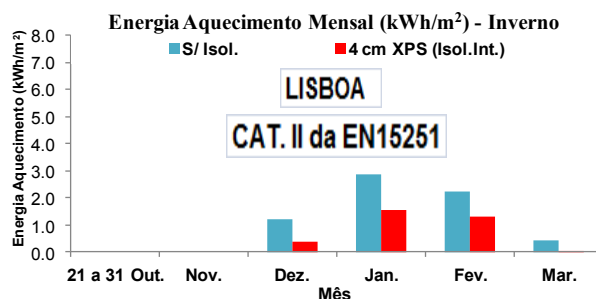
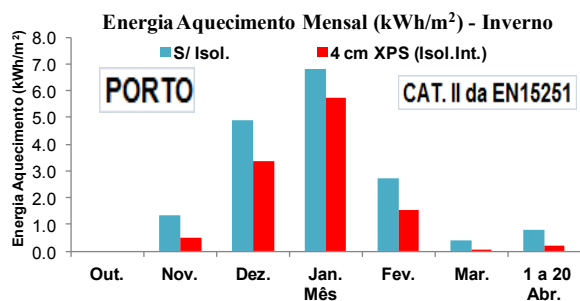
VALOR MENSAL DA ENERGIA DE AQUECIMENTO – CATEGORIA III

Loc.	Solução	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Março	Abril	Maio	Total (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	0.00	0.02	0.97	2.88	0.31	0.00	0.00	0.00	4.17
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	0.00	0.38	1.50	0.17	0.00	0.00	0.00	2.05
Lisboa	S/ Isol.	0.00	0.00	0.00	0.49	0.19	0.00	0.00	0.00	0.68
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	0.00	0.00	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00	0.11
Bragança	S/ Isol.	0.00	2.95	10.57	14.11	7.82	1.30	0.70	0.00	37.46
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	1.82	8.17	11.66	6.21	0.55	0.22	0.00	28.63
Faro	S/ Isol.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



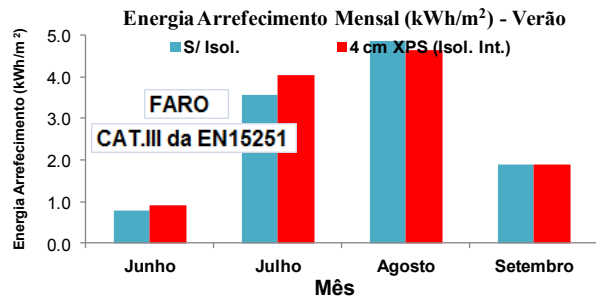
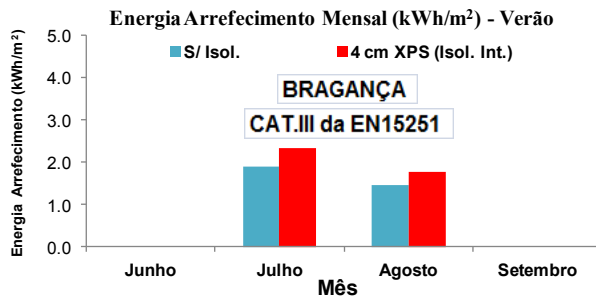
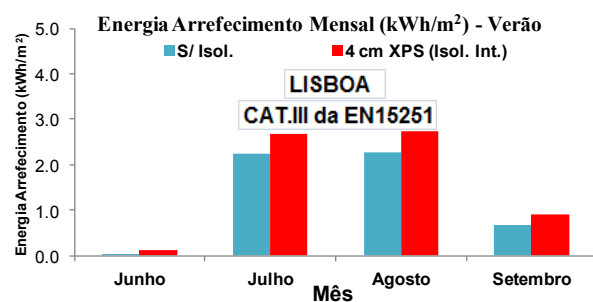
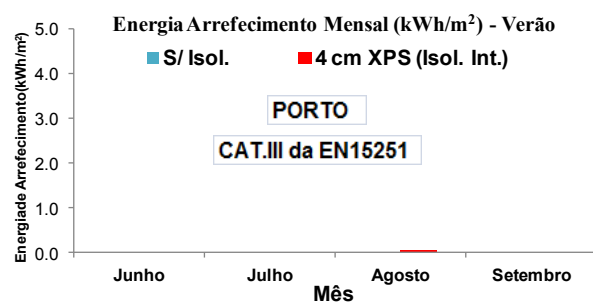
VALOR MENSAL DA ENERGIA DE AQUECIMENTO – CATEGORIA II

Loc.	Solução	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Março	Abril	Maio	Total (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	0.00	1.34	4.89	7.62	2.71	0.42	0.78	0.00	17.76
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	0.51	3.34	5.73	1.54	0.02	0.22	0.00	11.35
Lisboa	S/ Isol.	0.00	0.00	1.20	2.87	2.24	0.45	0.00	0.00	6.78
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	0.00	0.37	1.54	1.29	0.02	0.00	0.00	3.23
Bragança	S/ Isol.	0.00	6.79	15.85	19.38	12.51	4.52	3.79	1.23	64.06
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	5.14	13.03	16.47	10.48	3.12	2.47	0.33	51.04
Faro	S/ Isol.	0.00	0.00	0.02	0.17	0.30	0.00	0.00	0.00	0.49
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01



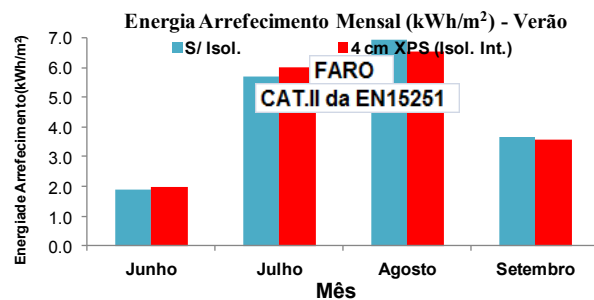
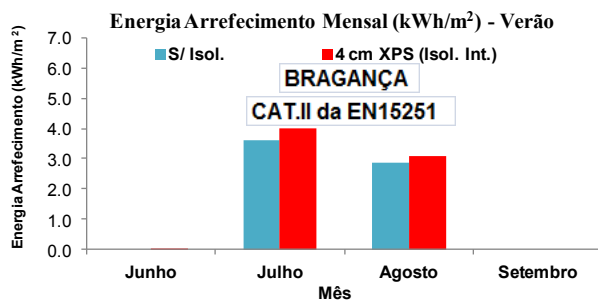
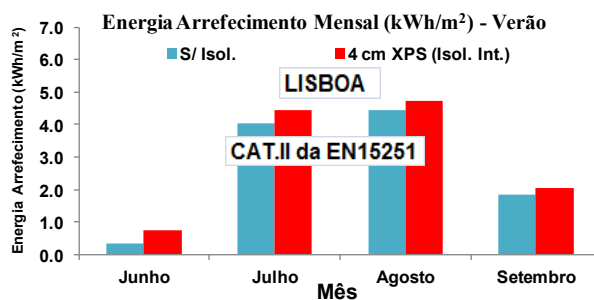
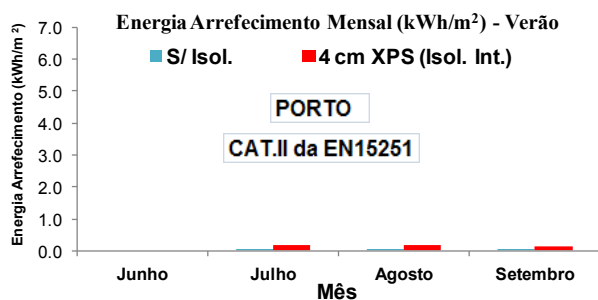
VALOR MENSAL DA ENERGIA DE ARREFECIMENTO – CATEGORIA III

Local	Solução	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Total (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Lisboa	S/ Isol.	0.01	2.24	2.26	0.69	5.19
	4 cm XPS (Isol Int)	0.12	2.67	2.75	0.89	6.43
Bragança	S/ Isol.	0.00	1.89	1.46	0.00	3.35
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	2.33	1.77	0.00	4.10
Faro	S/ Isol.	0.78	3.56	4.85	1.90	11.09
	4 cm XPS (Isol Int)	0.90	4.04	4.64	1.90	11.48



VALOR MENSAL DA ENERGIA DE ARREFECIMENTO – CATEGORIA II

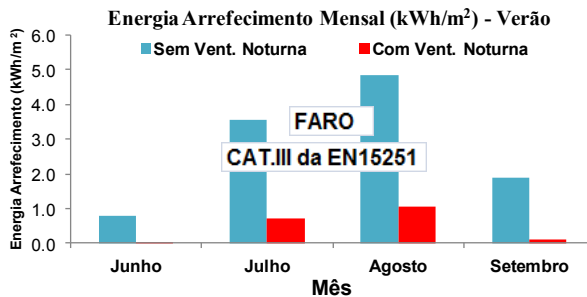
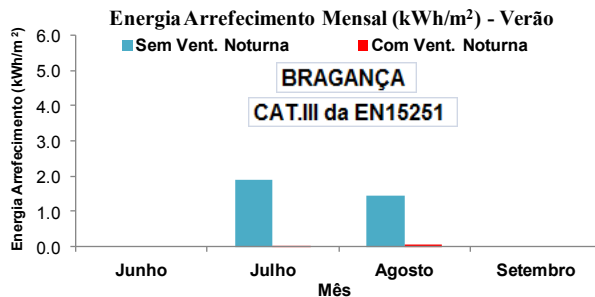
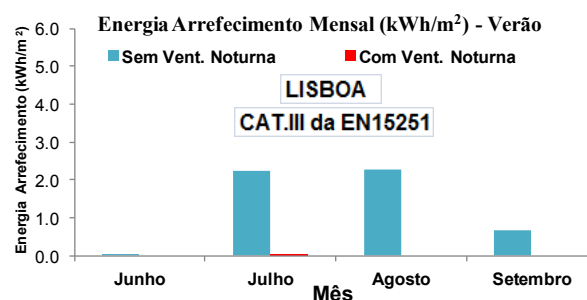
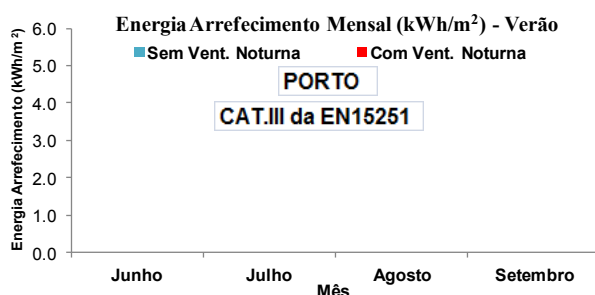
Local	Solução	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Total (kWh/m ²)
Porto	S/ Isol.	0.00	0.02	0.06	0.02	0.10
	4 cm XPS (Isol Int)	0.00	0.19	0.19	0.12	0.50
Lisboa	S/ Isol.	0.33	4.03	4.42	1.84	10.62
	4 cm XPS (Isol Int)	0.76	4.43	4.72	2.06	11.96
Bragança	S/ Isol.	0.00	3.63	2.88	0.00	6.51
	4 cm XPS (Isol Int)	0.03	4.00	3.06	0.00	7.09
Faro	S/ Isol.	1.87	5.68	6.93	3.67	18.15
	4 cm XPS (Isol Int)	1.99	5.99	6.53	3.56	18.07



AVI.3 INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO NOTURNA

VALOR MENSAL DA ENERGIA DE ARREFECIMENTO – CATEGORIA III

Local	Solução	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Total (kWh/m ²)
Porto	S/ Vent. Noturna	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	C/ Vent. Noturna	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lisboa	S/ Vent. Noturna	0.01	2.24	2.26	0.69	5.19
	C/ Vent. Noturna	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03
Bragança	S/ Vent. Noturna	0.00	1.89	1.46	0.00	3.35
	C/ Vent. Noturna	0.00	0.03	0.07	0.00	0.10
Faro	S/ Vent. Noturna	0.78	3.56	4.85	1.90	11.09
	C/ Vent. Noturna	0.00	0.73	1.07	0.10	1.91



VALOR MENSAL DA ENERGIA DE ARREFECIMENTO – CATEGORIA II

Local	Solução	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Total (kWh/m ²)
Porto	S/ Vent. Noturna	0.00	0.02	0.06	0.02	0.10
	C/ Vent. Noturna	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Lisboa	S/ Vent. Noturna	0.33	4.03	4.42	1.84	10.62
	C/ Vent. Noturna	0.00	0.60	0.09	0.02	0.70
Bragança	S/ Vent. Noturna	0.00	3.63	2.88	0.00	6.51
	C/ Vent. Noturna	0.00	0.33	0.39	0.00	0.72
Faro	S/ Vent. Noturna	1.87	5.68	6.93	3.67	18.15
	C/ Vent. Noturna	0.11	1.74	3.00	0.62	5.47

